



João Francisco da Silva Campôa

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

**Influência do clima no crescimento de
Pinheiro-Bravo (*Pinus pinaster*) e Pinheiro-
Manso (*Pinus pinea*) em florestas costeiras
de Portugal Continental**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente – Perfil Engenharia de Sistemas
Ambientais

Orientador: Maria Teresa Calvão Rodrigues, Professora
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientador: Carla Pimentel, Investigadora Doutorada,
Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Manuel Fernandes Rodrigues

Arguente: Doutora Isabel Maria Silva Sanches de Miranda

Vogal: Professora Doutora Maria Teresa Calvão Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2018

Influência do clima no crescimento de Pinheiro-Bravo (*Pinus pinaster*) e Pinheiro-Manso (*Pinus pinea*) em florestas costeiras de Portugal Continental.

Copyright © João Francisco da Silva Campôa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Doutora Teresa Calvão, por ter permitido ainda no segundo ano de faculdade, a realização de um estágio de investigação, que viria a ser o início da presente dissertação. À sua ajuda, empenho, disponibilidade e dedicação neste percurso, um muito obrigado.

À minha co-orientadora, Doutora Carla Pimentel, por toda a ajuda e colaboração, quer nos estágios desenvolvidos, quer na dissertação.

Ao Paulo Firmino, à Alexandra Lauw e à Helena Patrício do Instituto Superior de Agronomia, pela ajuda prestada e pelos conhecimentos transmitidos nestes últimos anos.

À minha mãe, pela sua luta e esforço, que me permitiu viver esta grande aventura que é a faculdade, que agora termina, e pelo qual, ficarei eternamente grato. À minha irmã e ao meu sobrinho, Tomás, por todo o carinho, preocupação e afeto. Ao meu cão Zullu. A estas pessoas, quero aqui deixar um grande OBRIGADO, por tudo!

À minha tia Lúcia, que é um exemplo para mim, e que me ajudou muito nos primeiros tempos da faculdade. Sem ela, as coisas teriam sido mais complicadas.

À minha família, que aqui não foi mencionada, mas que é um orgulho para mim, e que sempre me apoiou, e sempre me recebeu de braços abertos quando voltava a casa.

À Alexandra Amaral, à Ana Seco, ao Bernardo e ao Pedro Pereira, por serem não só grandes amigos, mas também por terem sido os melhores colegas de grupo que poderia ter tido na faculdade, e com os quais passei muitas horas a trabalhar. Ao Duarte Galhardo, por ter sido o melhor amigo que encontrei na faculdade e a pessoa que sempre me apoio e mais acreditou em mim.

À minha madrinha da faculdade, Nivalda Gonçalves, por ter sido um grande apoio para mim, ao longo de todos estes anos. Ao Filipe Peixoto, por ter sido o meu grande colega de quarto, a quem peço desculpa por ter tido sempre os sapatos espalhados pelo quarto. À Vânia Fantástica, ao Pedro JJ, à Catarina Belo, à Carolina Costa, à Joana Vera-Cruz, à Mariana Pepe Jorge, ao Daniel Sampaio pelos bons momentos divertidos que passamos juntos. À Ana Sofia Omaña, por me ouvir, e por todo o seu amor demonstrado! Ao Filipe Valadas.

À residência Fraústio da Silva por ter sido a minha segunda casa, onde levo os meus melhores momentos, que os guardo com muito saudade.

Aos grossos, aos pepásticos, aos meus “primos” e a todos os restantes amigos que fiz na residência e na faculdade, pois sem eles esta experiência não seria a mesma. O agradecimento em particular à lola por ter contribuído com parte da sua biblioteca.

À DAT, por me ter recebido estes últimos meses, e me proporcionar a primeira experiência no mundo do trabalho. À Rinntech por me ter fornecido gratuitamente a licença do *TSAPWin Scientific* por 3 meses.

OBRIGADO A TODOS!

Resumo

Atualmente o ser humano vivencia uma mudança na forma como o clima se manifesta, o que pode ser medido e verificado, por meio de metodologias diversas que compara o histórico registado com a atualidade em cada região do planeta. A vegetação tem uma importância relevante, ao servirem de sumidouros naturais de carbono e ao permitirem um arrefecimento da temperatura, onde as florestas assumem um papel de destaque no controlo das alterações climáticas. A dinâmica do crescimento das árvores é influenciada pelo clima, sendo necessário estudar de que forma esta influência afeta o crescimento, para assim, averiguar quais as consequências das alterações climáticas nas florestas.

A presente dissertação tem por objetivo mostrar de que forma o clima influencia o crescimento de duas espécies autóctones de Portugal, o Pinheiro-Bravo e o Pinheiro-Manso. Foi realizado um estudo dendroclimatológico, com base nas séries de crescimento das várias árvores amostradas e nas séries climáticas, uma vez que os anéis de crescimento anual têm a capacidade de reter a informação climática aquando da sua formação. O estudo da influência do gradiente climático foi conseguido com a amostragem de uma região a norte do Tejo, caracterizada por um clima mais húmido, Leiria, e duas a sul do Tejo, caracterizadas por um clima mais seco, Península de Setúbal e o Sudoeste Alentejano.

Constatou-se que o Pinheiro-Bravo tem uma preferência por climas mais húmidos, possuindo mecanismos que evitam os efeitos prejudiciais das secas e, por sua vez, o Pinheiro-Manso é uma espécie adaptada a climas mais secos, tendo um melhor desenvolvimento nas regiões a sul do Tejo. O crescimento do Pinheiro-Bravo correlaciona-se positivamente com a temperatura ao longo dos vários meses do ano. Contudo, a sul do Tejo, onde a precipitação é menor, o seu crescimento é reduzido. Já o crescimento do Pinheiro-Manso, correlaciona-se positivamente com as temperaturas dos meses de primavera, com um crescimento mais lento que o Pinheiro-Bravo. No entanto, em condições mais benévolas, tende a haver uma antecipação da época de crescimento.

Ao se relacionar o crescimento à precipitação, verificou-se que ambas as espécies se correlacionam com a precipitação acumulada nos meses anteriores ao crescimento. Tal situação indica que as espécies armazenam os seus metabolitos, usando-os quando as condições são mais propícias ao desenvolvimento.

Constatou-se que o Pinheiro-Bravo é a espécie mais suscetível a um futuro clima mais quente e seco, podendo vir a ter uma redução significativa na sua distribuição nas zonas a sul. Por outro lado, o Pinheiro-Manso é uma espécie mais resiliente aos efeitos das alterações climáticas, por ser mais resistente à seca e ao aumento da temperatura em certas zonas, conseguindo uma melhor recuperação após eventos extremos. Dada a sua maior adaptação ao clima seco, esta espécie pode vir a ter um aumento na sua distribuição local. As alterações climáticas previsivelmente vão levar a uma diminuição do crescimento das árvores e levar a uma alteração da paisagem existente.

Palavras-chave: Dendroclimatologia; Pinheiro-Bravo; Pinheiro-Manso; Clima; Alterações climáticas

Abstract

Nowadays, human population experience a change in the way the climate manifests itself, which can be measured and verified through distinct approaches that compare the recorded history with the present time in each region of the planet. Vegetation is highly regarded since it becomes the natural source of carbon sinks and allows for the cooling of temperature in which forests play a leading role in climate change control. The dynamics of tree growth are influenced by climate, and it is necessary to study how this influence affects growth, to investigate the consequences of climate change in forests.

The present dissertation aims to show how the climate influences the growth of two native species of Portugal, Maritime Pine (*Pinus pinaster*) and Stone Pine (*Pinus pinea*). A dendroclimatic study was carried out, based on the growth series of the sampled trees and the climatic series, as the annual growth rings can retain climatic information during their formation. The influence of the climatic gradient study was obtained by sampling a region north of the Tagus, characterised by a wetter climate, Leiria, and two south of the Tagus, characterised by a drier climate, Peninsula of Setúbal and Southwest of Alentejo.

It was observed that *P. pinaster* prefers humid climates, having mechanisms that avoid the harmful effects of droughts and, in turn, *P. pinea* is a species adapted to drier climates, having a better development in the regions south of the Tagus. *Pinus pinaster* growth correlates positively with temperatures throughout the year. However, at the south of the Tagus, its growth is reduced probably due to lower water availability. *Pinus pinea* growth, correlates positively with the temperatures in the spring months, being a slower growing species than *P. pinaster*. However, under more benevolent conditions, the growing season may start earlier

When comparing growth and precipitation, it was possible to verify that both species correlate with accumulated rainfall in the months previous the growing season. This implies that these species store their metabolites, using it whenever conditions are favourable for development.

It was found that *P. pinaster* is the most susceptible species to climate change and may have a significant reduction on its distribution in southern zones. On the other hand, *P. pinea* is a more resilient species to the effects of climate change, achieving a better recovery after extreme events. Due to its greater adaptation to the dry climate, this species may have an increase in its local distribution. Climate change is expected to lead to reduced tree growth and to changes in the present landscape.

Keywords: Dendroclimatology; *Pinus pinaster*; *Pinus pinea*; Climate; Climate change

Índice

1)	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Definição do âmbito.....	3
1.3.	Organização da dissertação.....	4
2)	Revisão da Literatura	5
2.1.	Diferenças entre Pinheiro-Bravo e Pinheiro-Manso	5
2.2.	Anéis de Crescimento anual.....	9
2.2.1.	Processo de formação.....	9
2.2.2	Falsos anéis.....	10
2.2.3	Influência do clima	10
2.3.	Dendrocronologia e Dendroclimatologia	13
2.4.1	Conceito.....	13
2.4.2.	Princípios básicos da dendrocronologia.....	13
2.4.	Clima de Portugal	15
2.4.1.	Gradiente climático	15
2.4.2.	Efeito das alterações climáticas	16
2.4.3.	Fenómenos de seca em Portugal.....	17
2.5.	Resposta das árvores a um cenário de alterações climáticas	17
3)	Caracterização das áreas de estudo.....	19
3.1.	Clima	19
3.2.	Relevo	21
3.3.	Litologia	21
3.4.	Ocupação e Uso do solo	21
4)	Metodologia	25
4.1.	Recolha e preparação das amostras	25
4.2.	Obtenção das séries de crescimento	26
4.3.	Obtenção das cronologias.....	27
4.4.	Identificação do sinal climático	29

4.5.	Modelo de influência climática no desenvolvimento dos anéis anuais de crescimento.....	30
5)	Resultados e Discussão	33
5.1.	Séries de crescimento	33
5.2.	Cronologias.....	48
5.3.	Identificação dos sinais climáticos nas cronologias	52
5.4.	Variação da alteração da espessura do anel	56
5.5.	Modelo de influência climática no desenvolvimento dos anéis anuais de crescimento.....	60
6)	Considerações finais	71
6.1.	Conclusão.....	71
6.2.	Limitações ao trabalho	74
6.3.	Trabalho futuro	74
7)	Referências Bibliográficas	74

Índice de Figuras

Figura 1.1. Diferença de temperatura entre 1901 e 2012	1
Figura 1.2. Diferença de temperatura entre 1901 e 2012	2
Figura 1.3. Cenários de emissões de gases de efeito de estuda	2
Figura 2.1. Distribuição do Pinheiro-Bravo em Portugal	7
Figura 2.2. Distribuição do Pinheiro-Manso em Portugal.....	8
Figura 2.3. Esquematização do processo de formação do lenho	9
Figura 2.4. Representação dos anéis de crescimento anual	10
Figura 2.5. Reação das árvores à precipitação.....	11
Figura 2.6. Reação das árvores ao tipo de solo.....	11
Figura 2.7. Reação das árvores à luz	12
Figura 2.8. Reação das árvores ao vento. Lenho de reação identificado por anéis mais escuros	12
Figura 2.9. Classificação climática de Portugal.....	15
Figura 3.1. Localização das regiões amostradas.....	19
Figura 3.2. Climogramas das regiões em estudo elaborados com base nas normais climatológicas das três regiões	20
Figura 3.3. Litologia numa área de raio de 5 km a partir da área de amostragem para cada uma das áreas em estudo: A – Leiria, B – Península de Setúbal, C – Sudoeste Alentejano.....	22
Figura 3.4. Ocupação e Uso do solo numa área de raio de 5 km a partir da área de amostragem para cada uma das áreas em estudo: A – Leiria, B – Península de Setúbal, C – Sudoeste Alentejano	23
Figura 4.1. Método para obtenção de verrumadas	26
Figura 4.2. Exemplo de verrumada utilizada no ImageJ. A seta identifica o sentido da medição.....	26
Figura 4.3. Exemplo do cálculo do indicador Gleichläufigkeit.....	27
Figura 4.4. Esquema metodológico utilizado no tratamento estatístico.....	29
Figura 4.5. Esquematização do funcionamento do modelo VS-Lite	32
Figura 5.1. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo em Leiria (L1)	35
Figura 5.2. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo em Leiria (L30)	35
Figura 5.3. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Manso em Leiria (L252)	36
Figura 5.4. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro Bravo na Península de Setúbal (PF2).....	36

Figura 5.5. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA1)	37
Figura 5.6. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA2)	37
Figura 5.7. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA3)	38
Figura 5.8. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA6)	38
Figura 5.9. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA7)	39
Figura 5.10. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Manso na Península de Setúbal (HA8)	39
Figura 5.11. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (CT1)	40
Figura 5.12. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (CT2)	40
Figura 5.13. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (AN1)	41
Figura 5.14. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (AN3)	41
Figura 5.15. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC1)	42
Figura 5.16. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC2)	42
Figura 5.17. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC3)	43
Figura 5.18. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC4)	43
Figura 5.19. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC5)	44
Figura 5.20. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC6)	44
Figura 5.21. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC7)	45

Figura 5.22. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano (ANPM)	45
Figura 5.23. Curva Indexada para o Pinheiro-Bravo em Leiria.....	48
Figura 5.24. Curva indexada para o Pinheiro-Manso em Leiria.....	49
Figura 5.25. Curva Indexada para o Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal	49
Figura 5.26. Curva Indexada para o Pinheiro-Manso na Península de Setúbal.....	50
Figura 5.27. Curva Indexada para o Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano	50
Figura 5.28. Curva Indexada para o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano.....	51
Figura 5.29. Correlação entre o crescimento e a temperatura para o Pinheiro-Manso. * Outono anterior ao crescimento	54
Figura 5.30. Correlação entre o crescimento e a temperatura para o Pinheiro-Bravo. * Outono anterior ao crescimento • Significância a 95%	54
<i>Figura 5.31. Correlação entre o crescimento e a precipitação para o Pinheiro-Manso. * Outono anterior ao crescimento • Significância a 95%</i>	<i>55</i>
Figura 5.32. Correlação entre o crescimento e a precipitação para o Pinheiro-Bravo. * Outono anterior ao crescimento • Significância a 95%	56
Figura 5.33. Variação da alteração da espessura do anel para as árvores de Pinheiro-Bravo. A – Leiria, B – Península de Setúbal, C - Sudoeste Alentejano	58
Figura 5.34. Variação da alteração da espessura do anel para as árvores de Pinheiro-Manso. A – Leiria, B – Península de Setúbal, C - Sudoeste Alentejano	59
Figura 5.35. Variação prevista da temperatura entre 2020 e 2100 para as três regiões em estudo consoante os cenários RCP4.5 e RCP8.5	60
Figura 5.36. Variação prevista da precipitação entre 2020 e 2100 para as três regiões em estudo consoante os cenários RCP4.5 e RCP8.5	61
Figura 5.37. Curva Indexada para as duas espécies na região de Leiria tendo por base o cenário RCP4.5	62
Figura 5.38. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso em Leiria, tendo por base o cenário RCP4.5	63
Figura 5.39. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo em Leiria, tendo por base o cenário RCP4.5	63
Figura 5.40. Curva Indexada para as duas espécies na região de Leiria tendo por base o cenário RCP8.5	64
Figura 5.41. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso em Leiria, tendo por base o cenário RCP8.5	64

Figura 5.42. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo em Leiria, tendo por base o cenário RCP8.5	64
Figura 5.43. Curva Indexada para as duas espécies na região da Península de Setúbal tendo por base o cenário RCP4.5	65
Figura 5.44. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP4.5	65
Figura 5.45. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP4.5.....	66
Figura 5.46. Curva Indexada para as duas espécies na região da Península de Setúbal tendo por base o cenário RCP8.5	66
Figura 5.47. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP8.5	67
Figura 5.48. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP8.5.....	67
Figura 5.49. Curva Indexada para as duas espécies na região do Sudoeste Alentejano tendo por base o cenário RCP4.5	68
Figura 5.50. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP4.5	68
Figura 5.51. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP4.5.....	69
Figura 5.52. Curva Indexada para as duas espécies na região do Sudoeste Alentejano tendo por base o cenário RCP8.5	69
Figura 5.53. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP8.5	70
Figura 5.54. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP8.5.....	70

Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Altitude e declive das regiões em estudo.....	21
Tabela 4.1. Período de amostragem e número de árvores amostradas para cada espécie em cada uma das regiões em estudo	25
Tabela 5.1. Número de árvores consideradas no tratamento estatístico, intervalo temporal das séries e índice GLK.....	34
Tabela 5.2. Espessura média dos anéis de crescimento (mm) por região	47
Tabela 5.3. Resultado dos testes para aferir a diferença entre médias da espessura dos anéis das espécies consoante a região.....	47
Tabela 5.4. Valor do teste Games-Howell.....	47
Tabela 5.5. Resultado dos testes para aferir a diferença entre médias da espessura dos anéis para cada região consoante a espécie.....	48
Tabela 5.6. Estatística das cronologias por local	52
Tabela 5.7. Limiares de temperatura e humidade no solo para o Pinheiro-Bravo e Pinheiro-Manso em cada região em estudo. T_1 – temperatura mínima para haver crescimento ($^{\circ}\text{C}$); T_2 – Temperatura mínima para o crescimento ótimo ($^{\circ}\text{C}$); M_1 – humidade mínima no solo para haver crescimento (v/v); M_2 – humidade mínima no solo para o crescimento ótimo (v/v)	61

1) Introdução

1.1. Enquadramento

Define-se por alteração climática, uma alteração no estado do clima diferente da média verificada, que se estende por um grande período, podendo-se prolongar durante décadas, ou até mais tempo. Tal alteração conduz a mudanças na frequência, intensidade, extensão espacial e duração dos eventos climáticos e eventos climáticos extremos (IPCC, 2012).

As alterações climáticas são parte da realidade atual e são amplamente estudadas por cientistas que afirmam resultar das emissões antropogénicas de gases de efeito de estufa, sendo os principais o dióxido de carbono, o metano e o óxido nítrico. A concentração destes gases tem aumentado desde a era pré-industrial, ao ponto que em 2011 as suas concentrações eram, respetivamente, 40%, 150% e 20% superiores à verificada na era pré-industrial (IPCC, 2013).

Devido às alterações climáticas, os riscos existentes serão agravados e surgirão novos riscos tanto para os sistemas sociais como para os sistemas naturais. Os aumentos de temperatura tornam os impactos mais severos, generalizados e irreversíveis que prejudicarão as espécies, os serviços dos ecossistemas e o desenvolvimento socioeconómico (IPCC, 2014a).

Os valores de temperatura nos últimos anos têm registado um aumento global mais acentuado no hemisfério norte do que no hemisfério sul (figura 1.1). Constata-se que, em relação à era pré-industrial, a temperatura do planeta em 2012 tinha aumentado cerca de 0,85°C. Verifica-se também uma diminuição de dias e noites frias, enquanto que se verificou um aumento dos dias e noites quentes. Também a temperatura nos oceanos aumentou, tendo obtido aumentos de 0,11°C por década entre 1971 a 2010 (IPCC, 2013; World Meteorological Organization, 2013)

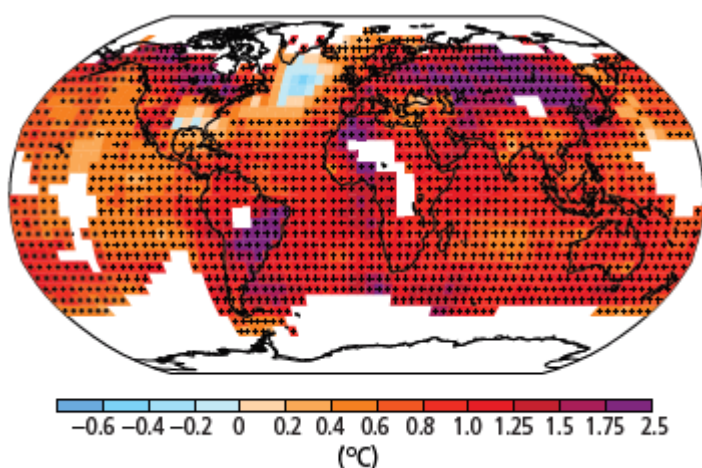


Figura 1.1. Diferença de temperatura entre 1901 e 2012 (fonte: IPCC, 2014a)

Em relação à precipitação tem-se verificado diferenças a nível regional (figura 1.2). A zona do Mediterrâneo, oeste africano e o este asiático têm sofrido uma diminuição da precipitação, enquanto que zonas como o norte europeu, a América do Norte, o oeste da América do Sul e a Austrália

apresentam um aumento na precipitação. Os eventos extremos de precipitação também se têm verificado na América do Norte e Europa (IPCC, 2013).

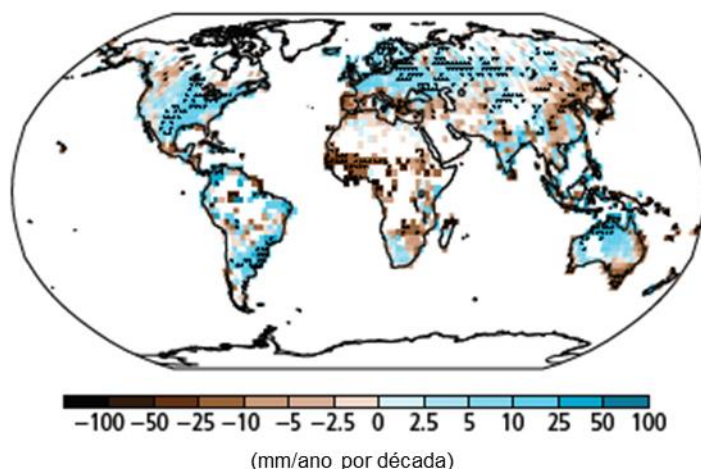


Figura 1.2. Diferença de temperatura entre 1901 e 2012 (adaptado de: IPCC, 2014a)

No quinto relatório do IPPC (IPCC, 2013) foram desenvolvidos quatro cenários para a emissão de gases de efeito de estufa (figura 1.3), de acordo com a força radioativa total, uma medida cumulativa de emissões dos gases, expressa em $W \cdot m^2$: um cenário de mitigação (RCP2.6) que atinge em 2100 um forçamento radiativo de $2,6 W \cdot m^2$; dois cenários de estabilização, um onde a força radiativa total estabiliza em $4,5 W \cdot m^2$ em 2100 (RCP4.5), e outro, em que a força radiativa total estabiliza em $6,0 W \cdot m^2$ em 2100; e um cenário pessimista de emissões continuas, em que a força radiativa total atinge $8,5 W \cdot m^2$ em 2100.

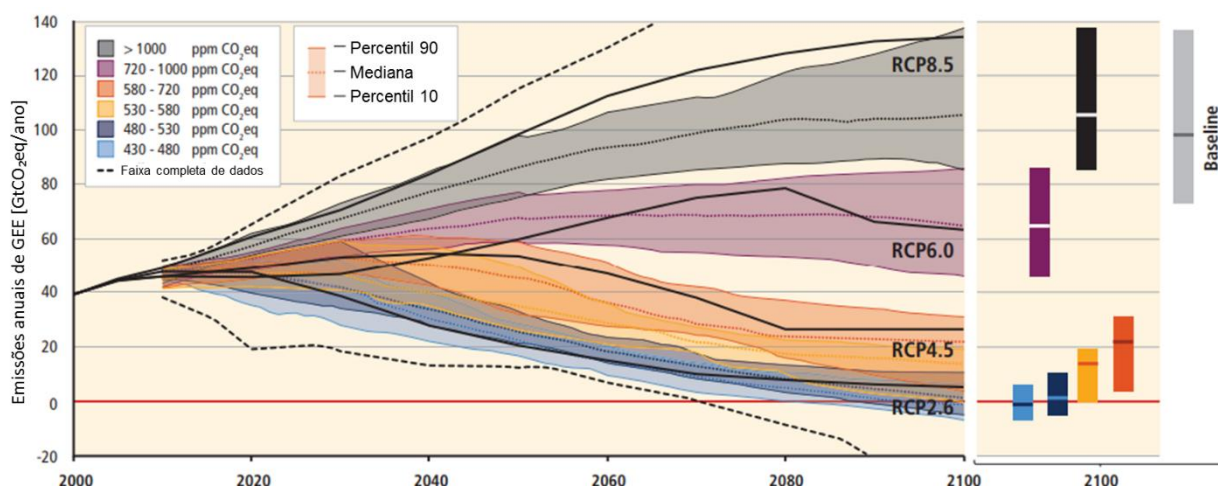


Figura 1.3. Cenários de emissões de gases de efeito de estufa (fonte: IPCC, 2014b)

Estes aumentos das emissões de gases criam uma expectativa de agravamento da situação climática, seguindo as tendências atuais. Colocando como período de referência o intervalo de tempo entre 1986 e 2005, a temperatura entre 2016 e 2035 terá um aumento entre $0,3$ a $0,7^{\circ}C$ e um aumento, consoante os vários cenários, entre $0,3$ a $4,8^{\circ}C$ para o período 2081-2100. Em relação à precipitação,

há possibilidade de um aumento nas zonas de maior latitude, e uma diminuição em zonas situadas a uma latitude intermédia e regiões subtropicais (IPCC, 2013).

Também na Europa se espera um cenário semelhante ao já mencionado, com um aumento geral da temperatura, um aumento da precipitação a norte da Europa e uma diminuição a sul da Europa. Esperam-se ondas de calor mais frequentes, intensas e secas a sul. Na Europa, a região mediterrânica é assim a região mais suscetível a impactos negativos (IPCC, 2012, 2014b).

As alterações climáticas atingem de forma dramática o sistema natural, ao acidificar o oceano, alterarem o sistema hidrológico, a extensão dos habitats e o comportamento das espécies. A abundância das espécies pode se reduzir, havendo assim riscos de extinção (IPCC, 2014a).

As florestas têm assim um importante papel no controlo às alterações climáticas ao servirem de sumidouros de carbono e permitirem um arrefecimento da temperatura através da evapotranspiração. Dentro dos vários biomas florestais, destacam-se as florestas temperadas que representam 65% dos sumidouros florestais de carbono (IPCC, 2014a)

O clima, especialmente a temperatura e a precipitação, possui uma grande importância no controlo e distribuição das espécies, sendo que é necessário que as necessidades climáticas sejam satisfeitas para que seja possível uma sustentabilidade dos ecossistemas. As florestas são sensíveis a uma grande variação de clima, dado que ao alterar as condições de uma determinada área, esta deixa de ser específica para a espécie. Há assim, uma comprovação da forte influência das alterações do clima na degradação das florestas (Costa *et al.*, 2017; Hayles *et al.*, 2007; Pereira *et al.*, 2006).

O desenvolvimento das florestas está em risco com as alterações climáticas, pois existe um maior risco de incêndios e de invasão de espécies. Existe também um maior risco de mortalidade por causas diretas (como por exemplo, secas) e causas indiretas (como por exemplo, doenças) (IPCC, 2014a).

Dado que a variação no clima afeta a dinâmica de crescimento das árvores (Hayles *et al.*, 2007) torna-se então importante averiguar de que forma é que o clima afeta o crescimento das mesmas, mostrando quais os seus fatores mais determinantes. Com o facto de se esperar um clima diferente do que hoje vemos, torna-se também relevante determinar de que forma essas alterações afetarão as florestas portuguesas.

Como já foi referido, o clima influencia o crescimento das árvores. Essa influência é registada nos anéis anuais de crescimento, devido à sua capacidade de reter as informações climáticas servindo como indicadores do clima. Dado que a relação crescimento-clima é específica da espécie, o estudo dos seus anéis de crescimento torna possível verificar de que forma o clima afetou o seu desenvolvimento (Lauw, 2011; Nabais *et al.*, 2014).

1.2. Definição do âmbito

A presente dissertação terá assim como objetivo avaliar, através da análise da espessura dos anéis de crescimento, o impacto climático no crescimento de Pinheiro-Bravo (*Pinus pinaster Aiton*) e Pinheiro-Manso (*Pinus pinea L.*). Foram estudadas três regiões costeiras onde aquelas espécies coexistem (Leiria, Península de Setúbal e o Sudoeste Alentejano), situadas num gradiente climático.

Uma vez que as espécies em estudo apresentam um padrão evolutivo semelhante, diferenciando-se na forma como se adaptaram ao clima do seu habitat (Keeley, 2012), e, sendo estas espécies características da floresta portuguesa, importantes do ponto de vista económico (Estratégia Nacional para as Florestas, 2015), ambas foram incluídas no trabalho numa tentativa de se perceber qual a resposta evolutiva que melhor se adapta às alterações previstas. É, ainda, objetivo do trabalho abordar de que forma é que as mudanças no clima poderão influenciar o desenvolvimento e distribuição destas espécies.

Esta dissertação pretende, desta forma, reunir informações para averiguar quais as consequências das alterações climáticas nas florestas, para que se possa planear as providências necessárias para tornar a floresta portuguesa mais resiliente. Este trabalho, pode assim, servir de documento de apoio às políticas de gestão dos recursos florestais.

1.3. Organização da dissertação

O presente trabalho encontra-se organizado em seis capítulos:

1. Introdução – Neste capítulo é descrito o enquadramento geral da presente dissertação, e da sua problemática central, que conduziu à definição dos seus objetivos. Apresenta-se, sumariamente, uma síntese da organização e dos conteúdos abordados no restante trabalho.
2. Revisão da literatura – Neste capítulo procede-se à revisão da literatura que ajudará a compreender toda a temática abordada ao longo do trabalho. É feita uma descrição das espécies em estudo, da metodologia utilizada, do clima em Portugal, e quais os efeitos que as alterações climáticas nas árvores.
3. Caracterização das áreas de estudo – Neste capítulo é feita uma caracterização das três regiões amostradas.
4. Metodologia – Neste capítulo é descrita toda a metodologia adotada ao longo do processo de trabalho, estando referidos os passos a obtenção dos sinais climáticos.
5. Resultados e Discussão – Neste capítulo é feita uma análise aos dados obtidos, onde se procede a uma explicação dos mesmos com base em estudos realizados.
6. Considerações finais – Neste capítulo é feita uma conclusão do trabalho, onde se refere quais os impactos que o clima teve no crescimento das espécies em causa, e qual a possível consequência das alterações climáticas nas florestas costeiras. É também exposto algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2) Revisão da Literatura

2.1. Diferenças entre Pinheiro-Bravo e Pinheiro-Manso

As espécies de pinheiros apresentam duas estratégias adaptativas principais. Numa, os pinheiros adaptaram-se a ambientes com fatores abióticos mais limitantes (menos água e nutrientes), contudo, menos propícios à existência de fogos. Esta espécie tem crescimento mais lento, e no geral tem sementes de grandes dimensões dispersas por animais. A outra estratégia consiste num crescimento rápido em ecossistemas mais ricos, também com uma dispersão mais rápida através de sementes de pequenas dimensões dispersas pelo vento (penisco), mas com uma maior suscetibilidade à ocorrência de fogos florestais. As espécies presentemente estudadas exemplificam estas duas estratégias, que se diferenciam entre si devido às suas adaptações climáticas, estratégias de crescimento e dispersão (Keeley, 2012).

Ambas as espécies são de origem mediterrânica, sendo nativas de Portugal Continental. Embora sejam encontradas facilmente ao longo da costa portuguesa, havendo áreas de coexistência (figura 2.1 e figura 2.2), o Pinheiro-Bravo tem uma maior distribuição a norte do Tejo, enquanto, o Pinheiro-Manso tende a evitar regiões a norte do Tejo e no interior (Ledo *et al.*, 2014).

Apesar de semelhantes, estas apresentam algumas diferenças. O Pinheiro-Bravo pode atingir uma altura até aos 40 metros, enquanto o Pinheiro-Manso chega até aos 30 metros. Embora apresentem folhas aciculares persistentes, as folhas do Pinheiro-Bravo atingem os 27 centímetros, enquanto que as folhas do Pinheiro-Manso atingem um comprimento máximo de 15 centímetros. A maturação do Pinheiro-Manso ocorre ao terceiro ano, enquanto a maturação do Pinheiro-Bravo ocorre entre os 10 e 15 anos (Costa *et al.*, 2008; Ferreira *et al.*, 2001; Serralves, s.d.; Vinãs *et al.*, 2016).

A nível do habitat, estas espécies também apresentam requisitos diferentes. Apesar de ambas terem preferência por solos siliciosos e arenosos, o Pinheiro-Bravo consegue colonizar habitats até aos 1500 metros de altitude, embora acima dos 800 metros sofra deformações devido ao vento e à neve. Por sua vez, o Pinheiro-Manso encontra-se a menores altitudes, colonizando áreas até aos 1000 metros de altitude (Nabais *et al.*, 2014; Schweingruber, 1989; UTAD, s.d.a, s.d.b; Vinãs *et al.*, 2016).

Entre as espécies estudadas, o Pinheiro-Bravo apresenta uma necessidade maior na disponibilidade hídrica, colonizando habitats com uma precipitação anual entre os 800 e 1000 mm, ao lado que, o Pinheiro-Manso apenas requer locais com uma precipitação anual de 600 mm. O Pinheiro-Bravo apresenta também uma maior necessidade intensidade luminosa, enquanto o Pinheiro-Manso é uma espécie mais tolerante à sombra. A nível da temperatura, ambas as espécies conseguem suportar temperaturas até aos 40 °C (Ferreira *et al.*, 2001; Serralves, s.d; UTAD, s.d.a, s.d.b; Vinãs *et al.*, 2016).

Devido à dispersão das suas sementes, o Pinheiro-Bravo consegue uma dispersão mais eficaz em relação ao Pinheiro-Manso que se encontra em zonas mais agregadas. Contudo, o Pinheiro-Manso é mais tolerante à competição, conseguindo até, suportar melhor áreas mistas do que puras, por sua vez, o Pinheiro-Bravo requer espaços mais abertos (Awada *et al.*, 2003; Ledo *et al.*, 2014).

Em Portugal, segundo o inventário florestal mais recente (ICNF, 2013), as florestas de Pinheiro-Bravo têm vindo a diminuir desde os anos 90, sendo que atualmente representam 23% da floresta portuguesa (ocupando 714 mil hectares). Já as florestas de Pinheiro-Manso têm vindo a aumentar. Entre 1995 e 2010 a área arborizada de Pinheiro Manso aumentou 54%, ocupando atualmente 6% da floresta portuguesa (200 mil hectares, aproximadamente).

As duas espécies apresentam também uma importância na economia nacional. O Pinheiro-Bravo possui diversas utilizações consoante a idade, podendo ser usado para obtenção de resina, celulose e madeira. Estes últimos usos, são os mais importantes, uma vez que se estima produção de madeira que ronda os 5,8 milhões de m³/ano, levando a que se estime uma valorização dos espaços ocupados por Pinheiro-Bravo de 93 €/ha (Estratégia Nacional para as Florestas, 2015; Ferreira *et al.*, 2001).

Por sua vez, também o Pinheiro-Manso apresenta diversos usos, podendo ser cultivado para madeira, resina, proteção do solo contra a erosão devido às suas raízes profundas, e para comercialização de pinhões. Ao contabilizar uma produção de 33 milhões de kg/ano, sendo responsável por 30% das exportações dos frutos de casca rija, a produção de pinhões torna-se o principal setor económico para a produção de Pinheiro-Manso, sendo desta forma, estimada uma valorização das áreas de produção de Pinheiro-Manso de 497 €/ha. (Estratégia Nacional para as Florestas, 2015; Schweinnguber, 1989; Vinãs *et al.*, 2016).

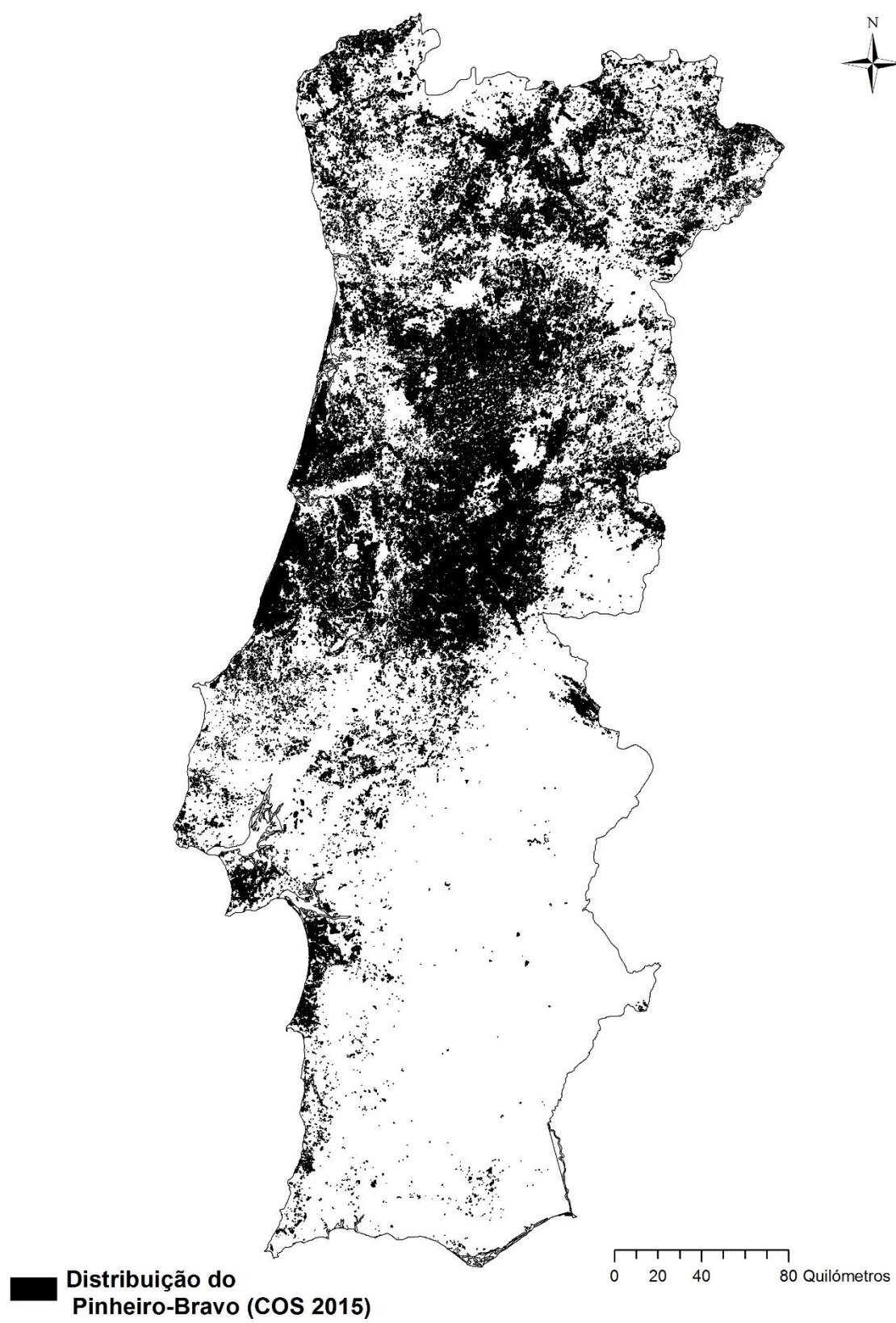


Figura 2.1. Distribuição do Pinheiro-Bravo em Portugal

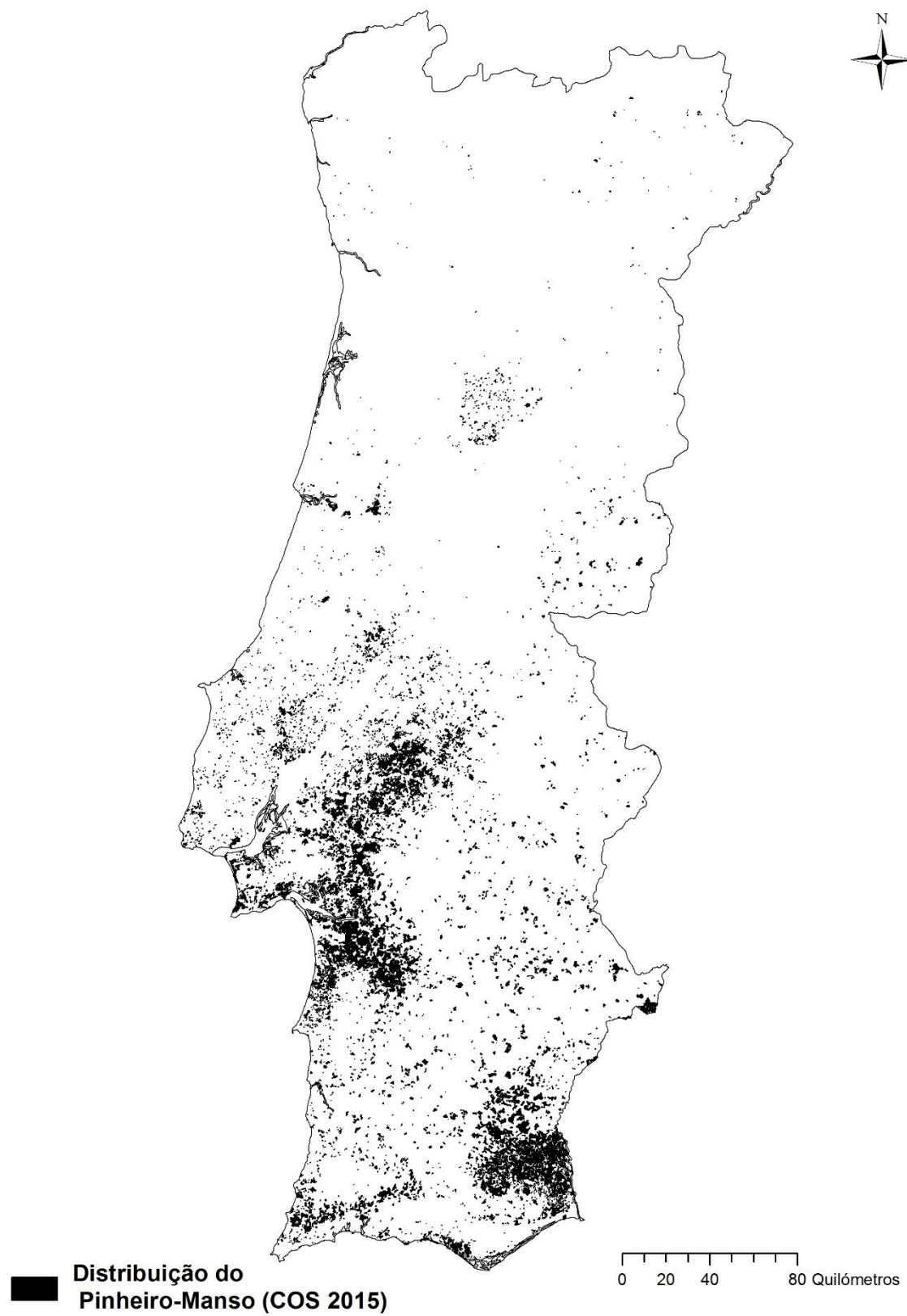


Figura 2.2. Distribuição do Pinheiro-Manso em Portugal

2.2. Anéis de Crescimento anual

2.2.1. Processo de formação

O crescimento radial das árvores deve-se a um meristema secundário, o câmbio vascular, que se situa entre o floema e o xilema. Através da diferenciação de células cambiais resulta a formação de células do floema ou de células xilémicas secundárias (Alves, 1968; Luz, 2011).

O processo de formação do lenho (figura 2.3) através da diferenciação das células xilémicas secundárias consiste numa sequência de cinco etapas (Rathgeber *et al.*, 2016):

- 1) Divisão de uma célula-mãe do câmbio numa nova célula-filha;
- 2) Expansão da célula formada e formação da parede primária;
- 3) Formação da parede secundária;
- 4) Lenhificação da parede secundária;
- 5) Morte celular programada, permanecendo apenas a parede secundária.

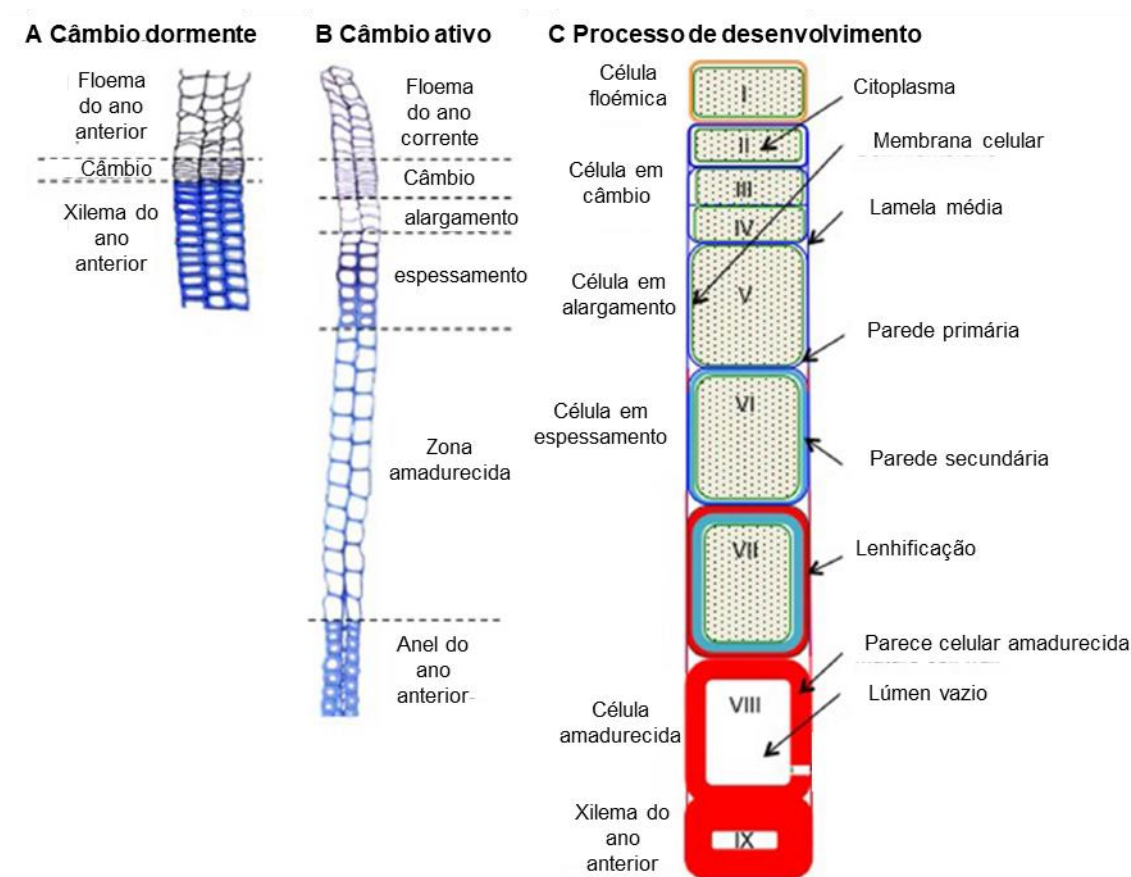


Figura 2.3. Esquematização do processo de formação do lenho (adaptado de: Rathgeber *et al.*, 2016).

Nas regiões temperadas, a Primavera caracteriza-se por dar início ao período vegetativo. A temperatura dá início à atividade do câmbio que esteve em pausa no Inverno (período de dormência). Existe então um acompanhamento das estações do ano por parte da atividade cambial (Lauw, 2011; Rathgeber *et al.*, 2016).

No início da estação de crescimento surgem células com paredes delgadas, um lúmen (espaço delimitado pela parede celular) grande e cor clara. No Outono, época que representa o fim da estação favorável, as células vão diminuindo a sua atividade vital e apresentam uma parede mais espessa, lúmen menor e uma cor mais escura. Assim um anel de crescimento anual engloba uma camada de cor clara e uma camada de cor escura como pode ser observado na figura 2.4.

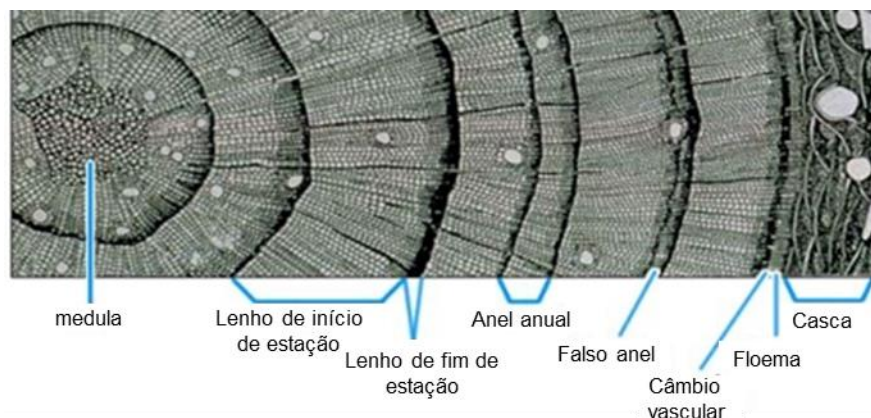


Figura 2.4. Representação dos anéis de crescimento anual (adaptado de: <http://www.qsstudy.com/biology/formation-annual-ring>)

2.2.2 Falsos anéis

Durante a época de formação do lenho de início de estação, as condições climáticas podem-se tornar mais severas por um determinado período, produzindo células com características semelhantes às células de fim de estação. O mesmo pode acontecer durante o fim da estação, em que melhores condições do clima traduzem-se na formação de células com características semelhantes às das células de início de estação (Fritts, 1976).

A existência de uma banda composta por lenho de fim de estação entre o lenho de início de estação e vice-versa é denominada de falso anel (figura 2.4). Em certas ocasiões é possível distinguir os falsos anéis por existir uma transição gradual do tamanho das células, no entanto, em outras ocasiões é necessário recorrer a datação cruzada. A existência de falsos anéis permite a identificação de acidentes devido a episódios menos favoráveis que ocorreram ao longo do crescimento da árvore (Alves, 1968;Fritts, 1976).

2.2.3 Influência do clima

Como já foi referido anteriormente a atividade cambial está dependente do clima. O desenvolvimento da árvore é, assim, afetado diretamente pelas condições climáticas do ano do crescimento (como por exemplo disponibilidade hídrica, temperatura, luz) ou de forma indireta pelas condições climáticas do ano anterior (Fowler, 1988).

As principais variáveis climáticas que influenciam a formação dos anéis de crescimento anual são: precipitação, luz e vento.

➤ Precipitação

Mais importante do que o total da precipitação anual para o desenvolvimento das plantas é a água que fica retida no solo e que pode, assim, ser usada. O crescimento correlaciona-se com a precipitação do inverno anterior ao crescimento, e com a precipitação no início da época de crescimento (Hayles *et al.*, 2007; Nabais *et al.*, 2014).

Em regiões com maiores valores de precipitação, os anéis formados apresentam uma ligeira variação na sua sequência, em comparação com as regiões com pouca precipitação que apresentam sequência variável (figura 2.5) (Schweinnguber, 1993).

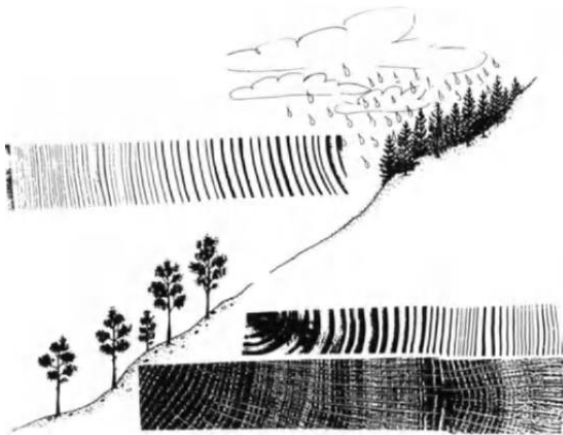


Figura 2.5. Reação das árvores à precipitação (fonte: Schweingruber, 1993)

➤ Solo

As características do solo no respeitante à drenagem, profundidade e capacidade de fornecimento de nutrientes influenciam a taxa de crescimento das árvores. Quando o solo é profundo e húmido as árvores apresentam anéis largos (figura 2.6a). Mas quando o solo é rochoso e seco as raízes das árvores são superficiais e então os anéis formados são estreitos (figura 2.6b). No caso das árvores se situarem num lamaçal e sob num local alagado e apresentarem raízes superficiais, os anéis formados também são estreitos (figura 2.6c) (Schweinnguber, 1993).

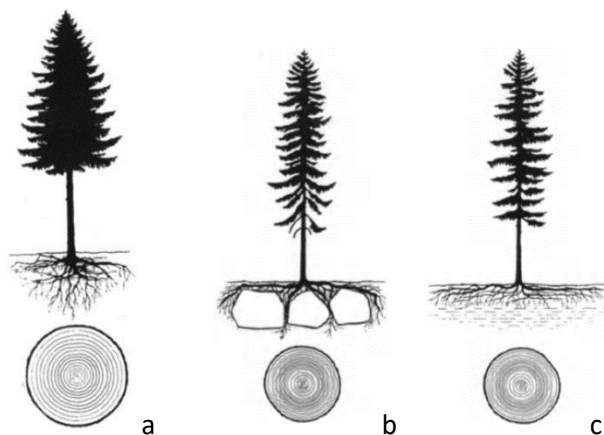


Figura 2.6. Reação das árvores ao tipo de solo (fonte: Schweingruber, 1993)

➤ Luz

O crescimento das árvores está dependente da quantidade de radiação disponível. Na figura 2.7a estão representadas duas árvores dominantes, que recebem mais luz e apresentam anéis mais largos, e uma árvore dominada que recebe menos luz e apresenta anéis mais estreitos. No entanto, após um desbaste, as árvores dominadas recebem uma maior disponibilidade de luz, o que resulta numa rápida taxa de crescimento e assim, anéis mais largos (figura 2.7b) (Schweinnguber, 1993).

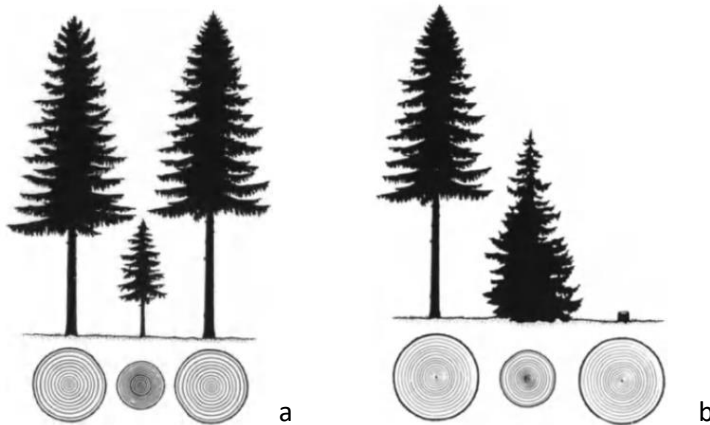


Figura 2.7. Reação das árvores à luz (fonte: Schweingruber, 1993)

➤ Vento

Ao soprar constantemente numa determinada direção, o vento promove a descentralização da seção transversal do tronco. Em situações de vento fraco existe a formação de uma medula excêntrica, mas sem lenho de reação (figura 2.8a). Em situações de vento forte, a par da medula excêntrica, existe a formação de lenho de reação, lenho originado devido a um estímulo externo (figura 2.8b). Em situações de vento diferenciado, existe a formação de uma medula excêntrica e lenho de reação consoante a intensidade do vento no período de formação (figura 2.8) (Schweinnguber, 1993).

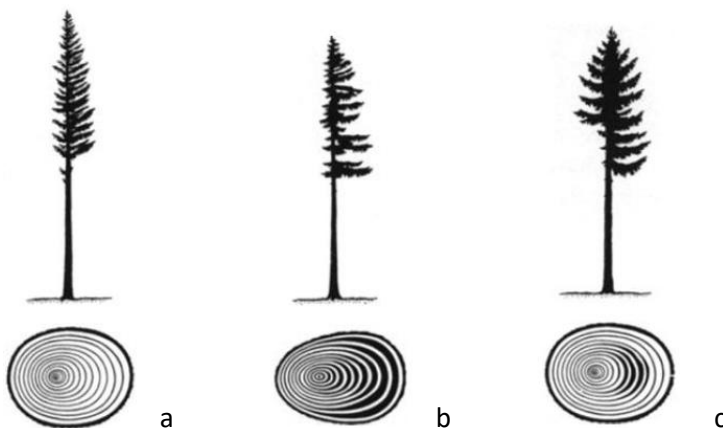


Figura 2.8. Reação das árvores ao vento. Lenho de reação identificado por anéis mais escuros (fonte: Schweingruber, 1993)

2.3. Dendrocronologia e Dendroclimatologia

2.4.1 Conceito

A dendrocronologia é a ciência responsável pela datação dos anéis anuais de crescimento das árvores, sendo assim possível criar uma série cronológica. Dado que os anéis de crescimento têm capacidade de reter a informação climática da altura da sua formação, é então possível determinar e recriar o clima passado. O ramo da dendrocronologia que lida com séries climáticas denomina-se dendroclimatologia (Fritts, 1976).

Nos estudos dendroclimatológicos é importante ter atenção ao local onde se efetua a recolha das amostras e da árvore de onde são extraídas. O local terá de ser escolhido consoante o objetivo do trabalho, tendo em conta que locais em que a humidade do solo seja o fator limitante, os anéis anuais de crescimento podem ser usados para estudar o efeito da precipitação. Em casos em que a temperatura é o fator limitante, o estudo a ser realizado pode ter como objetivo a perceção do impacto da temperatura no crescimento. No caso das árvores, terão que ser escolhidas aquelas que não sejam afetadas por causas não climáticas (Sheppard, 2010).

Em certas situações quando os fatores são muito limitantes, não ocorre crescimento, e assim, nenhum anel é formado. Noutras situações já referidas, há a formação de falsos anéis. Tais situações podem não permitir que se determine a correta sequência cronológica, sendo para tal necessário recorrer a datação cruzada (Fritts, 1976).

De acordo com Hughes (2002), os pontos fortes do uso da dendrocronologia para o estudo do clima residem na capacidade de datar, com um elevado grau de confiança o crescimento da árvore; a existência de grandes padrões à escala geográfica de uma variação comum dos anéis de crescimento das árvores ano-a-ano; o desenvolvimento de uma extensa base de dados de séries cronológicas; a eficácia dos modelos lineares de correlação entre os anéis de crescimento e o clima; e o entendimento dos vários mecanismos que levam à variabilidade das características das árvores.

Em contrapartida, Hughes (2002) identifica como pontos fracos, o facto das cronologias capturarem apenas uma fração da variabilidade climática; a resposta poder estar limitada a um período específico; algumas das respostas não responderem diretamente a uma variável climática mensal ou sazonal; as árvores não poderem registar as variáveis climáticas com o interesse desejado; a suposição de que os fatores que controlaram a formação dos anéis no passado são os mesmos que controlam o crescimento atualmente; e o facto das técnicas usadas para remover os efeitos não-climáticos limitarem a representação fiel das variações climáticas numa escala temporal maior.

2.4.2. Princípios básicos da dendrocronologia

Com a aplicação da análise dos anéis de crescimento anual para estudos climáticos, são tidos em conta diversos princípios que atuam como uma generalização que é aceite como verdadeira, servindo assim como base para o raciocínio. Os princípios aplicados à dendrocronologia são os seguintes (Fritts, 1976; Grissino-mayer, 2017):

➤ Princípios da uniformidade

Os processos físicos e biológicos que relacionam o clima com o crescimento das árvores são os mesmos que ocorriam no passado. Ou seja, tanto no passado como no presente, as limitações climáticas existentes originam as mesmas limitações no crescimento da árvore (formação dos anéis de crescimento anual).

➤ Princípio dos fatores limitantes

O crescimento da árvore é limitado consoante o fator mais limitante. No entanto, caso o fator limitante deixe de limitar o crescimento da árvore, este irá aumentar até outro fator se tornar limitante. Por exemplo, em regiões em que a precipitação é o fator limitante, o crescimento não pode ir além do que é permitido pela disponibilidade hídrica. Neste caso, a largura dos anéis é função da precipitação. Caso a precipitação deixe de ser um problema, pode aparecer outro fator climático, como por exemplo a temperatura que limitará a taxa de crescimento das árvores. Nesta situação, a largura dos anéis passará a ser função da temperatura.

➤ Princípio do crescimento agregado da árvore

A variação que uma árvore apresenta nos seus anéis de crescimento pode ser desagrupada por um conjunto de fatores ambientais, humanos e naturais que afetaram ao longo do tempo o padrão de crescimento da árvore.

➤ Princípio da amplitude ecológica

O termo amplitude ecológica refere-se à distribuição geográfica de uma determinada espécie. Certas espécies têm áreas geográficas extensas, outras pequenas. Os fatores tornam-se mais limitantes à medida que as espécies se aproximam do limite do seu habitat.

➤ Princípio da seleção do local

O local escolhido para a extração das amostras deve ser aquele cujo fator limitante seja a variável que se pretenda estudar. Por exemplo, caso se pretenda verificar a sensibilidade das árvores à precipitação, deverá ser escolhido preferencialmente um local mais árido do que um local mais húmido.

➤ Princípio da datação cruzada

A construção das séries cronológicas é possível devido ao facto de ser possível fazer a correspondência de padrões de largura dos anéis (ou outras características), entre diversas séries, e assim, identificar o ano exato.

➤ Princípio da replicação

A extração de mais do que uma verrumada por árvore permite reduzir a variabilidade intra-árvore. Também devem ser recolhidas no local amostras em mais do que uma árvore, idealmente cerca de 20 árvores (Fowler, 1988). A recolha de várias amostras permite, assim, uma diminuição do “ruído” e assim maximizar o sinal do fator ambiental pretendido.

2.4. Clima de Portugal

2.4.1. Gradiente climático

Portugal localiza-se no sudoeste europeu entre as latitudes 37°N e 42°N e as longitudes 9,5°W e 6,5°W, uma zona de transição entre o anticiclone dos Açores e as zonas das depressões subpolares. Apresenta também uma orografia muito destinta, com as maiores altitudes a norte e as menores a sul. Devido à sua variação latitudinal, à proximidade com o oceano e à orografia, o território português apresenta um grande gradiente climático (Miranda *et al.*, 2006).

De acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (s.d.b), o clima de Portugal é considerado, segundo a classificação de Köppen-Geiger, como temperado, tipo C. No entanto, pode ser dividido em dois subtipos (figura 2.9). A sul do rio Tejo o clima é considerado maioritariamente do tipo Csa, que se caracteriza por ter verões quentes e secos. A norte do Tejo, o clima caracteriza-se por verões secos e suaves, classificando-se por Csb. Existe ainda uma pequena região no Baixo Alentejo cujo clima é considerado árido (BSk). Esta divisão climática foi também identificada em trabalhos de outros autores ao estudarem a espacialização da precipitação e da temperatura (de Lima *et al.*, 2013; Martins *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2010).

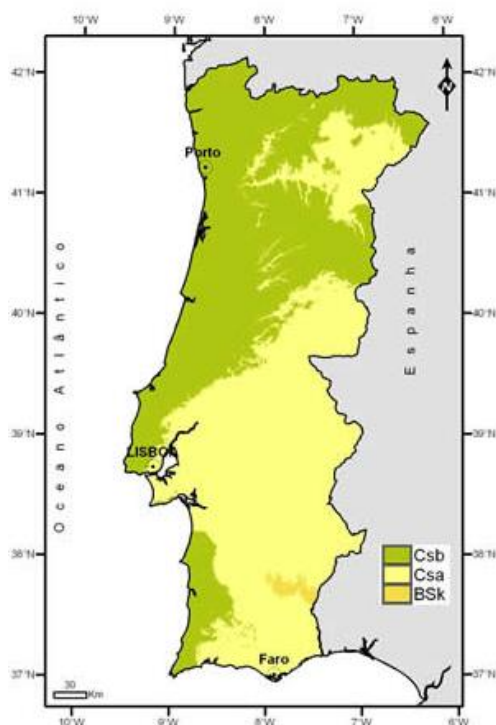


Figura 2.9. Classificação climática de Portugal (IPMA, s.d.b)

Em relação à precipitação, existe um gradiente entre o norte e o sul, sendo o norte mais húmido do que o sul (Trigo e Dacamara, 2000). A norte, a precipitação anual é superior a 3000 mm (em zonas de maior altitude), e possui baixa sazonalidade. No sul, a precipitação anual acumulada pode obter valores abaixo dos 600 mm, sendo concentrada em alguns meses do ano, os mais frescos (Martins *et al.*, 2012; Miranda *et al.*, 2006).

O inverno é a estação do ano que contribui mais para a precipitação em Portugal, com 42%, já a precipitação de verão apenas contribui com 6%. A restante precipitação encontra-se dividida entre a primavera e o outono, no entanto, varia de ano para ano (Miranda *et al.*, 2006). No verão, o clima está associado ao anticiclone dos Açores, que traz vento quente e seco para Portugal. Já no inverno, o país é afetado maioritariamente por ventos vindos de oeste que trazem ar húmido, e pelas depressões existentes, ambos responsáveis pelos fenómenos de precipitação (Giorgi e Lionello, 2008; Trigo e Dacamara, 2000).

Outro fator que influencia a precipitação, mas também a temperatura, é a Oscilação do Norte Atlântico (NAO), um dos fenómenos mais importantes de variabilidade atmosférica que afeta o Mediterrâneo (Espírito Santo *et al.*, 2013; Giorgi e Lionello, 2008; Trigo *et al.*, 2002). Este fenómeno é caracterizado pela diferença de pressão entre a Islândia e os Açores (de Lima *et al.*, 2015). Depressões intensas na Islândia levam a um anticiclone forte nos Açores (fase positiva da NAO) e uma depressão fraca na Islândia traduz-se num anticiclone fraco nos Açores (fase negativa da NAO) (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, s.d.a).

Durante as fases positivas da NAO, Portugal fica sob influência anticiclónica, tendo baixos valores de nebulosidade e de precipitação, e valores mais elevados de temperatura, podendo levar a secas e a ondas de calor e resultar em temperaturas mais elevadas no Inverno. Em fases negativas da NAO, Portugal continental fica sob influência de ar frio vindo do norte, havendo efeitos contrários aos efeitos da fase positiva (Carnicer *et al.*, 2011; Luterbacher *et al.*, 2004; Trigo *et al.*, 2002; Trigo *et al.*, 2013).

Tal como a precipitação, a temperatura também revela um gradiente espacial e temporal. Os invernos variam entre frios a suaves, com temperaturas mínimas entre 0 e 12 °C. Os verões variam entre suaves a quentes, com temperaturas máximas entre 15 e 27,5 °C. As temperaturas mais baixas estão presentes em regiões mais a norte, próximas da costa e regiões a maior altitude. No caso dos eventos extremos de temperatura, as regiões mais interiores tendem a sofrer mais deste problema, em comparação com as regiões mais costeiras (Benali *et al.*, 2012; Miranda *et al.*, 2006).

2.4.2. Efeito das alterações climáticas

Devido às atividades antropogénicas, como por exemplo a queima de combustíveis fósseis e a desflorestação, as emissões de poluentes responsáveis por uma mudança de clima têm aumentado. A região mediterrânica encontra-se muito vulnerável, sendo que em Portugal, são as regiões a sul do Tejo as mais suscetíveis (Pires *et al.*, 2010; Santos, 2006).

Tem-se verificado uma diminuição da precipitação na primavera, especialmente no mês de março, e um aumento da precipitação no outono, com especial ênfase no mês de outubro (de Lima *et al.*, 2013; Paulo *et al.*, 2012). No entanto, embora seja esperada uma diminuição da precipitação total, pensa-se que os fenómenos de precipitação sejam mais extremos (de Lima *et al.*, 2015; Espírito Santo *et al.*, 2013).

A nível da temperatura, tem-se verificado um aumento a partir de 1976, notando-se, assim, uma tendência para um território mais quente (Páscoa *et al.*, 2017b; Ramos *et al.*, 2011). O aumento da temperatura, verifica-se tanto na mínima como na máxima, em todas as estações, especialmente na

primavera e no verão (de Lima *et al.*, 2013; Espírito Santo *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2011). O aumento é maior para a temperatura mínima, facto que faz diminuir a amplitude térmica (Miranda *et al.*, 2006).

Também se tem verificado um maior número de fases positivas da NAO. Tal situação implica, tal como foi referido anteriormente, que Portugal seja afetado com temperaturas mais elevadas e condições menos propícias para fenómenos de precipitação (World Meteorological Organization, 2013).

Devido ao aumento da temperatura, espera-se um aumento da evaporação que, em conjunto com uma diminuição da precipitação, conduz a uma maior severidade das secas (Páscoa *et al.*, 2017a; Vicente-Serrano *et al.*, 2014). Também é esperado uma maior frequência das mesmas, com uma tendência para o sul ficar mais seco (Greve *et al.*, 2014; Pires *et al.*, 2010).

2.4.3. Fenómenos de seca em Portugal

As secas são um fenómeno natural que ocorre devido à falta de precipitação, levando a consequências visíveis como é o caso da degradação do solo e a perda da vegetação. Devido à situação geográfica de Portugal, a maioria dos fenómenos de seca estão associados ao bloqueio das frentes polares devido ao anticiclone subtropical do Atlântico Norte. Tem se verificado nos últimos anos episódios de seca mais frequentes e intensos, havendo uma intensificação da frequência das secas nos meses de fevereiro a abril (Pires *et al.*, 2010).

Os principais eventos de seca em Portugal são os que ocorreram nos seguintes períodos: 1943-46, 1948-49, 1964-65, 1974-76, 1980-83, 1990-92, 1994-95, 1998-99, 2004-06 e 2012. Nas secas de 1943-46, 1948-49 e 1990-92 foram afetadas, essencialmente, regiões a norte do Tejo e nas secas de 1980-83, 1994-95 e 2012, regiões a sul do Tejo. Os restantes episódios afetaram igualmente as regiões a norte e a sul do Tejo. Destaca-se a seca de 2004-2006 pois afetou a totalidade do território e a que englobou um maior número de meses consecutivos em seca (Agência Portuguesa do Ambiente, 2018; Instituto de Meteorologia I.P., 2012; Pires *et al.*, 2010).

2.5. Resposta das árvores a um cenário de alterações climáticas

De uma forma resumida, espera-se para a Península Ibérica, e consequentemente, para Portugal, num cenário de alterações climáticas, devido ao aumento dos gases de efeito de estufa, um clima mais quente, com redução da precipitação, sendo mais frequentes e severos os episódios de seca. Desde modo, as florestas ter-se-ão de adaptar a este novo clima.

Dada a importância do CO₂ (dióxido de carbono) para a fotossíntese, este composto quando em falta, chega a ser um fator limitante para o crescimento das árvores (La Marche *et al.*, 1984). No entanto, espera-se que no futuro haja um aumento deste composto devido às emissões antropogénicas. Um aumento da concentração de CO₂ atmosférico leva também a um aumento da assimilação de carbono por parte das árvores, embora a uma escala menor do que é emitido para a atmosfera (van der Sleen *et al.*, 2014).

Um aumento de CO₂ leva a um aumento da temperatura ótima para a fixação do carbono durante a fotossíntese (Voelker *et al.*, 2017) e a um aumento da eficácia no uso da água (van der Sleen *et al.*,

2014). Tal aumento da eficácia no uso da água pode ser explicado ou por um aumento da taxa fotossintética, ou por uma redução na água perdida durante a transpiração da árvore (Silva *et al.*, 2010). Em contrapartida, este aumento de CO₂ leva a um aumento da sensibilidade da árvore à temperatura (Voelker *et al.*, 2017).

Com isto, dado que se espera um aumento quer do CO₂ atmosférico, quer da temperatura, e dado que o uso da água se torna mais eficaz nestas condições, seria de esperar um aumento do crescimento das árvores nesta situação. Tal acontece em situações climaticamente favoráveis (Granda *et al.*, 2013; Linares *et al.*, 2016). Mas, em situações mais severas não ocorre crescimento. Embora haja um aumento na eficiência no uso da água, tal não é suficiente para se sobrepor ao stress causado pelo aumento da temperatura e indisponibilidade hídrica (Brito *et al.*, 2016; Tognetti *et al.*, 2000).

As espécies que habitam regiões mais secas tendem a acumular mais carbono do que as que habitam em locais mais húmidos (Peñuelas *et al.*, 2008), levando a que essas espécies possam reduzir a quantidade de água que perdem durante a transpiração. Nesta situação está-se perante um efeito de bola de neve, pois em regiões mais quentes há um menor arrefecimento da temperatura ambiente por parte da transpiração, o que pode levar a um aumento da temperatura local.

O tipo de resposta ao aumento do CO₂ é específico de cada espécie, havendo espécies mais suscetíveis do que outras. Tal situação pode levar a que no futuro haja uma alteração da floresta mediterrânica devido à resposta contrastante a este problema (Granda *et al.*, 2013).

As temperaturas elevadas aceleram a mortalidade, uma vez que aumentam o stress hídrico, independentemente da precipitação que tenha ocorrido (Allen *et al.*, 2010). Nestas situações existe uma maior relação entre o crescimento das árvores e a precipitação do verão anterior, do que em regiões menos quentes e secas (Hacket-Pain *et al.*, 2016).

O aumento da temperatura no fim do verão e inverno leva a um prolongamento da estação de crescimento, havendo assim custos na respiração e gastos das reservas (Allen *et al.*, 2010). Tal situação leva a que o crescimento no ano seguinte seja afetado negativamente (Hayles *et al.*, 2007).

Para evitar os efeitos da seca, as árvores têm dois tipos de respostas: isohídrica e anisohídrica. Numa resposta isohídrica os estomas são fechados para minimizar a transpiração e, assim, a perda de água. Numa resposta anisohídrica, o fecho dos estomas são menos severos e a transpiração continua a taxas relativamente altas (Allen *et al.*, 2010).

As respostas isohídricas protegem o xilema de cavitação, mas dado que reduzem a fotossíntese e a transpiração continua, podem levar a uma falta de carbono na árvore. Nas respostas anisohídricas continuam os ganhos de carbono, mas pode levar a árvore a uma falha hidráulica. Deste modo, o aumento da temperatura pode provocar a morte das árvores devido à “fome” de carbono ou devido a uma falha hidráulica (Allen *et al.*, 2010).

3) Caracterização das áreas de estudo

Por forma a caracterizar a influência do gradiente climático foram amostradas três zonas: Leiria, Península de Setúbal e Sudoeste Alentejano, localizadas no litoral oeste (figura 3.1). Na Península de Setúbal foram amostrados dois povoamentos: Pinhal das Freiras e Herdade da Apostiça. No sudoeste alentejano foram estudados três povoamentos: Aberta-Nova, Costa Terra e Pinheiro da Cruz. Em Leiria foram amostrados talhões da Mata Nacional de Leiria.

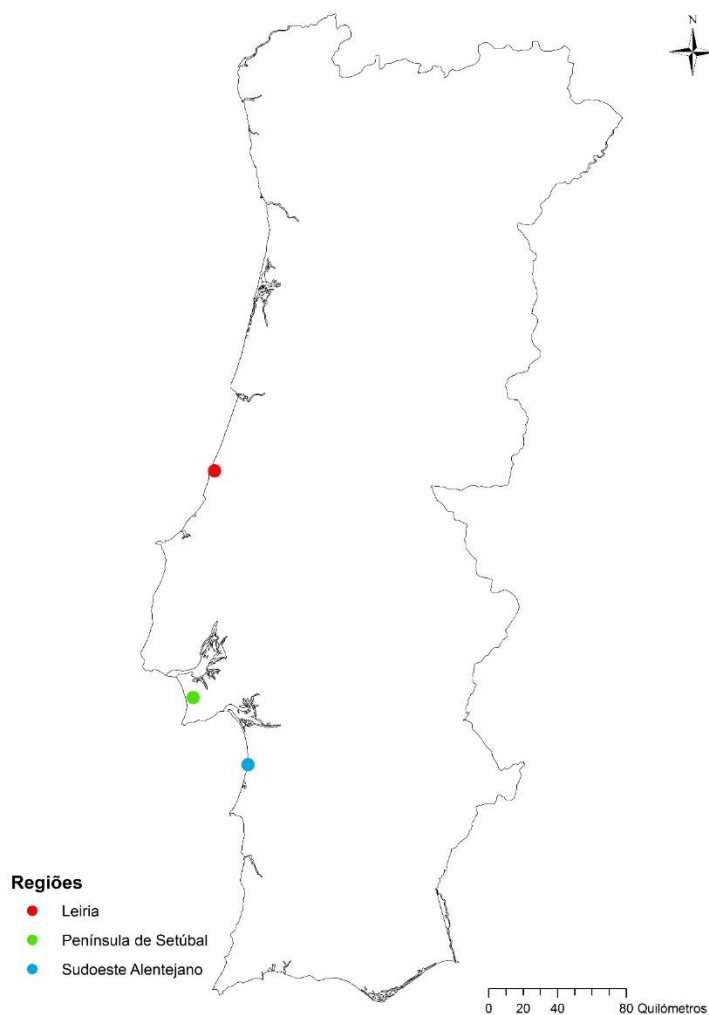


Figura 3.1. Localização das regiões amostradas

3.1. Clima

A figura 3.2 apresenta o diagrama termopluviométrico (climograma) das três regiões em estudo. Em todos verifica-se a existência de duas estações bem marcadas: a estação quente (final da primavera-verão), com reduzida precipitação, e a estação fria (outono-inverno) com precipitação elevada. Estas são características típicas do clima mediterrânico.

Observa-se claramente um gradiente climático (figura 3.2): de norte para sul a temperatura média anual aumenta e a precipitação anual diminui. Verifica-se, ainda, um aumento da extensão e severidade do período seco/quente.

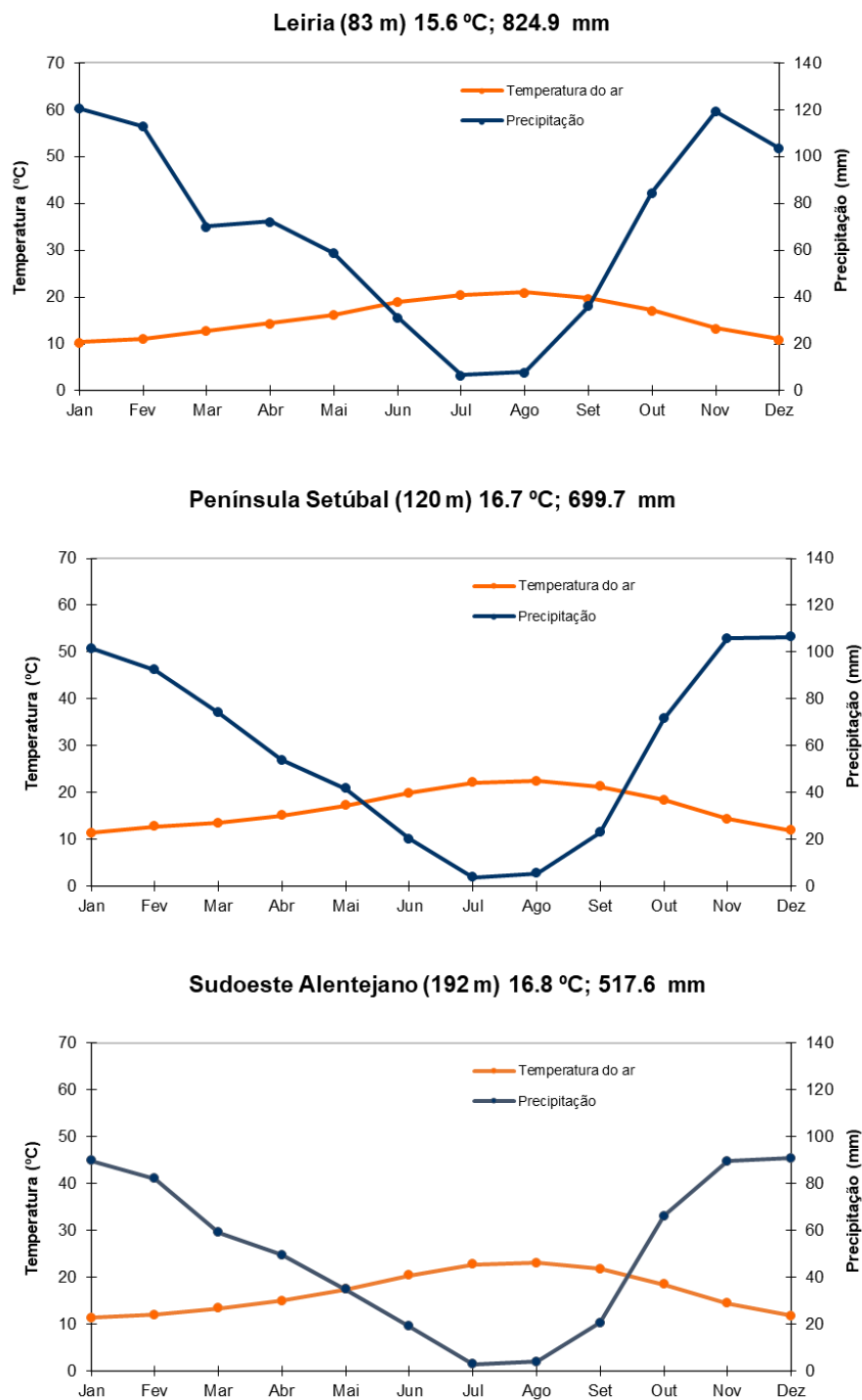


Figura 3.2. Climogramas das regiões em estudo elaborados com base nas normais climatológicas das três regiões (fonte: <http://portaldoclima.pt/pt/>)

3.2. Relevo

No respeitante à altitude as duas regiões mais a sul apresentam uma gama de valores bem como média semelhantes e inferiores a Leiria (tabela 3.1). No referente ao declive não se notam diferenças tão acentuadas. Estes dados foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer* (ASTER) fornecido pela ESRI PORTUGAL com 27,7 m resolução espacial.

Tabela 3.1. Altitude e declive das regiões em estudo.

	Altitude (m)		Declive (%)	
	Gama de valores	Média	Gama de valores	Média
Leiria	12 - 234	104	0 - 57	10
Península de Setúbal	0 - 92	43	0 – 68	7
Sudoeste Alentejano	0 - 98	55	0 - 38	6

3.3. Litologia

Na figura 3.3 apresenta-se informação sobre a litologia das três regiões, expressa pela percentagem das várias classes presentes numa área de 5 km de raio à volta dos locais.

Leiria apresenta maior heterogeneidade quanto à litologia, seguindo-se a Península de Setúbal e depois o Sudoeste Alentejano. Em todas as regiões predominam formações sedimentares. A classe “Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas” é a classe litológica comum às várias regiões, a sua importância em termos de área aumentando de norte para sul.

3.4. Ocupação e Uso do solo

Na figura 3.4 apresenta-se o uso e ocupação do solo referente à COS 2015 (Carta de Uso e Ocupação do Solo). Em todas as regiões a classe dominante é a das florestas e dentro das florestas as florestas de Pinheiro-Bravo.

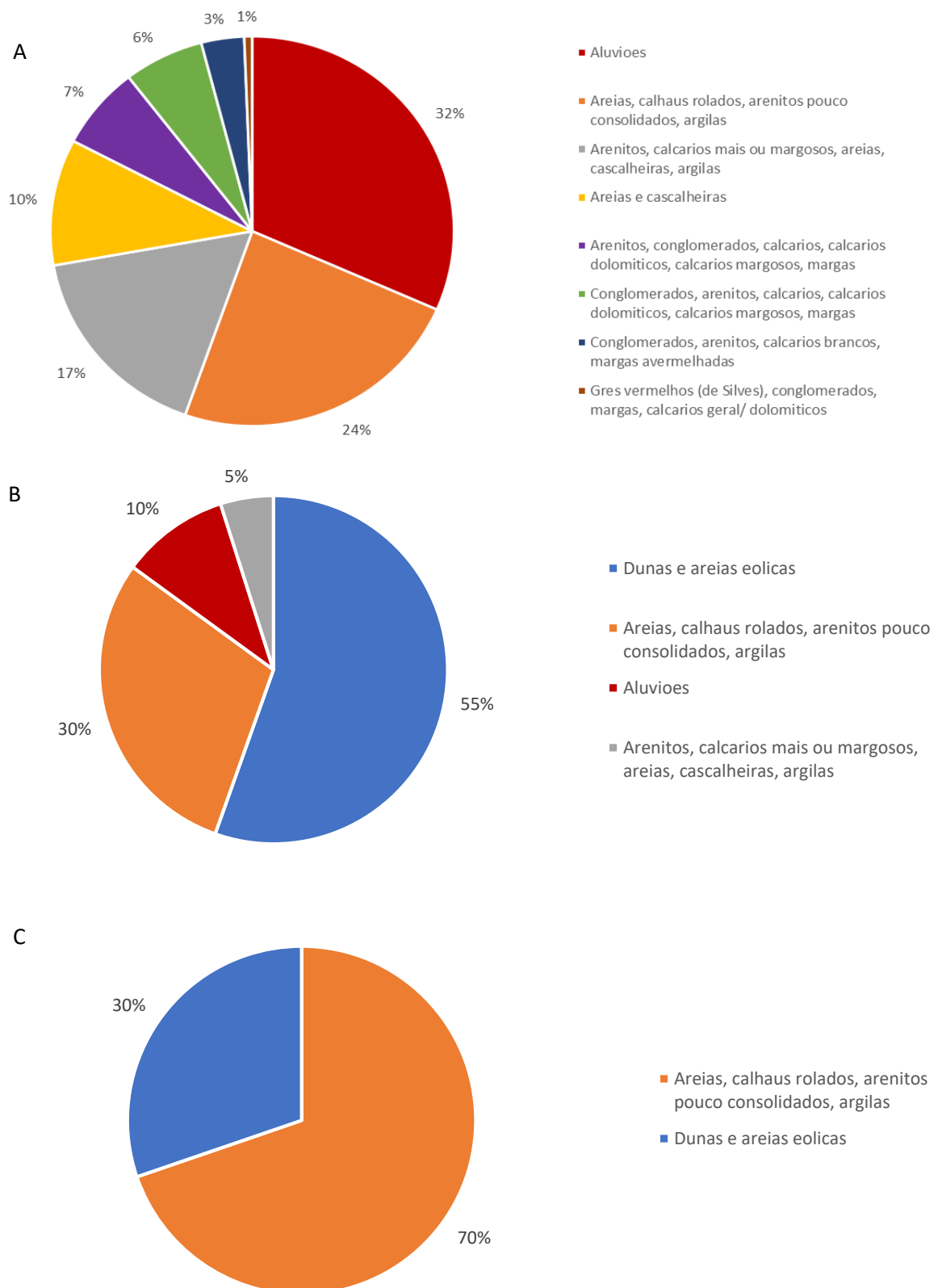


Figura 3.3. Litologia numa área de raio de 5 km a partir da área de amostragem para cada uma das áreas em estudo: A – Leiria, B – Península de Setúbal, C – Sudoeste Alentejano (fonte: GIS)

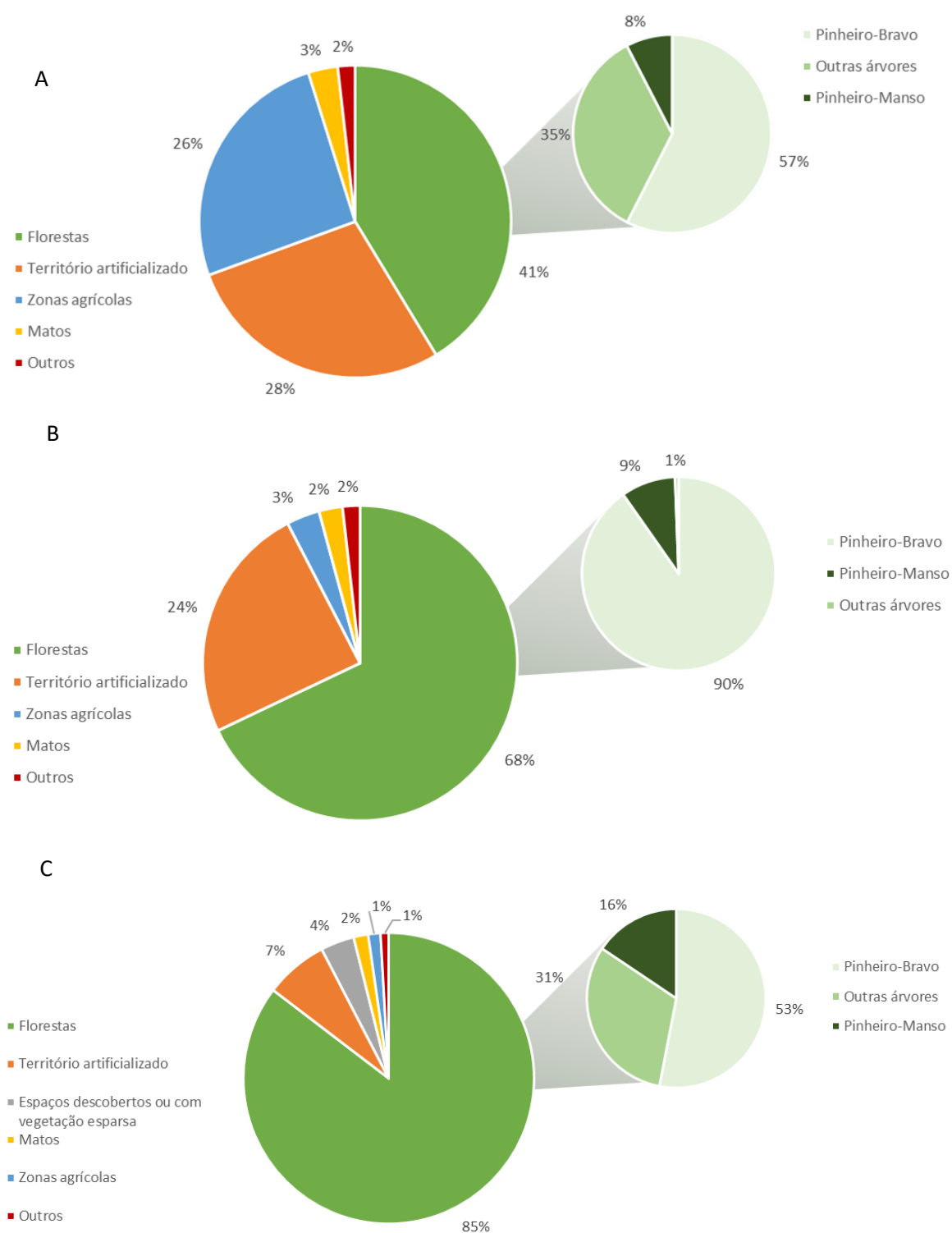


Figura 3.4. Ocupação e Uso do solo numa área de raio de 5 km a partir da área de amostragem para cada uma das áreas em estudo: A – Leiria, B – Península de Setúbal, C – Sudoeste Alentejano (fonte: COS 2015)

4) Metodologia

4.1. Recolha e preparação das amostras

A amostragem de Pinheiro-Bravo foi efetuada em 2013, já a amostragem de Pinheiro-Manso foi efetuada em 2015 na Península de Setúbal, e em 2016, em Leiria e no Sudoeste Alentejano. A tabela 4.1 apresenta a indicação, para cada local, do número de árvores amostradas e a data de amostragem. Em cada região o Pinheiro-Manso foi amostrado apenas num único local. O número de locais amostrados para o Pinheiro-Bravo variou, consoante as regiões, entre 2 e 11.

Tabela 4.1. Período de amostragem e número de árvores amostradas para cada espécie em cada uma das regiões em estudo

Região	Espécie	Local	Nº de árvores amostradas	Período de amostragem
Leiria	Pinheiro-Bravo	L1	5	13/03/2013
		L30	5	15/03/2013
	Pinheiro-Manso	L252	15	02/02/2016
Península de Setúbal	Pinheiro-Bravo	PF2	5	22/01/2013
		HA1	6	18/01/2013
		HA2	5	18/01/2013
		HA3	5	04/04/2013
		HA6	5	04/04/2013
		HA7	5	04/04/2013
	Pinheiro-Manso	HA8	15	29/07/2015
Sudoeste Alentejano	Pinheiro-Bravo	CT1	5	28/02/2013
		CT2	5	28/02/2013
		AN1	6	28/02/2013
		AN3	5	29/03/2013
		PC1	5	22/03/2013
		PC2	5	29/03/2013
		PC3	5	22/03/2013
		PC4	5	29/03/2013
		PC5	5	29/03/2013
		PC6	5	22/03/2013
		PC7	5	22/03/2013
	Pinheiro-Manso	ANPM	18	17/02/2016

A recolha das amostras foi efetuada de acordo com a bibliografia existente (Cook e Kairiukstis, 1992; Fowler, 1988; Sheppard, 2010) tendo sido retiradas duas amostras por árvore, com direções opostas e com recurso a verrumas SUUNTO. De forma a evitar influências não climáticas no crescimento e obter informação climática mais realista e que refletisse a dinâmica de crescimento com maior precisão foram amostradas árvores dominantes. Foram também rejeitadas árvores com danos e doenças. O número de árvores recolhidas também seguiu as indicações bibliográficas que sugere uma amostragem de pelo menos 20 árvores, sendo que pode haver estudos com menos.

As verrumadas foram retiradas à altura do peito (1,30 metros) tendo o cuidado da extração se realizar perpendicularmente ao tronco de modo a obter todos os anéis de crescimento (desde a casca até à medula) (figura 4.1A). Obteve-se também a altura, o diâmetro à altura do peito e a espessura da casca para cada árvore. As verrumadas foram identificadas e posteriormente colocadas em calhas de madeira (figura 4.1B) para que pudessem ficar estabilizadas e secar. Posteriormente as amostras foram lixadas com uma lixadeira até se obter uma superfície plana e lisa, com os anéis de crescimento bem visíveis. As amostras foram então digitalizadas, tendo-se obtido imagens em formato JPEG.

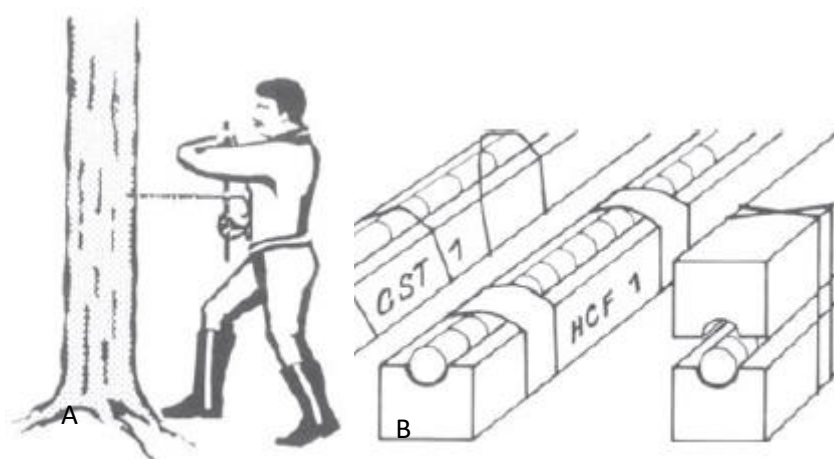


Figura 4.1. Método para obtenção de verrumadas (fonte: Schweinnguber, 1989)

4.2. Obtenção das séries de crescimento

Foi utilizado o *software* ImageJ para fazer uma ampliação das amostras para assim ser possível uma melhor distinção dos lenhos (figura 4.2), sendo que as medições foram feitas da medula até à casca.



Figura 4.2. Exemplo de verrumada utilizada no ImageJ. A seta identifica o sentido da medição.

Para cada verrumada foi obtida uma série de medições dos anéis de crescimento. A série representativa de cada árvore foi calculada pela média das séries de cada par de verrumadas. O *software* usado para a sincronização das séries de crescimento foi: *TSAP-Win Scientific*.

De modo a verificar a semelhança global entre pares de curvas de anéis de crescimento foi utilizado o indicador estatístico Gleichläufigkeit (GLK). Este indicador mede a concordância entre duas curvas (séries) através da tendência ascendente e descendente de dois pontos consecutivos no tempo (figura 4.3). Assim, para cada ano e série observa-se o valor da espessura do anel. Se a árvore cresceu mais do que no ano anterior o indicador toma o valor de $\frac{1}{2}$, se a árvore cresceu menos do que no ano anterior toma o valor $-\frac{1}{2}$. Caso não tenha havido crescimento o indicador toma o valor 0. O valor do indicador de cada ano obtém-se pela soma dos dois valores individuais (1 de cada série). O valor final do indicador (refere-se ao par de séries) é obtido pela soma dos valores anuais, dividido pelo número de anos (geralmente exprime-se em percentagem) e indica a medida global de semelhança entre as duas curvas (Schweingruber, 1989).

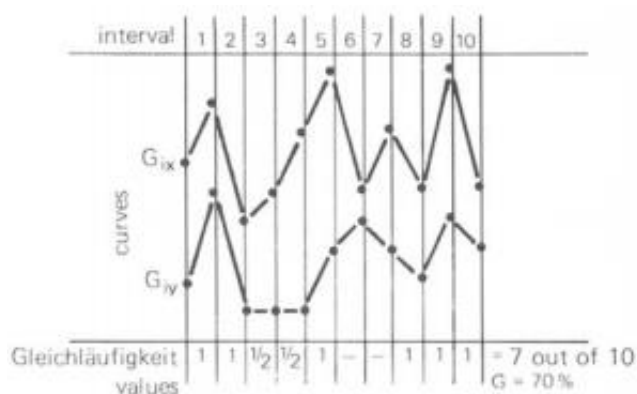


Figura 4.3. Exemplo do cálculo do indicador Gleichläufigkeit

Este indicador é importante pois ajuda na datação de amostras com idade desconhecida e corrobora o facto de que curvas referentes a árvores diferentes podem apresentar uma tendência comum se tiverem sido influenciadas por fatores semelhantes. Nos estudos de dendrocronologia geralmente apenas são considerados pares de curvas que apresentem um valor do índice superior a 50% (Lauw, 2011; Schweingruber, 1989).

4.3. Obtenção das cronologias

Por forma a ser possível a comparação de séries de crescimento de diferentes amostras torna-se necessário, através de um processo de padronização, remover as variações de origem não climática, causadas por fatores como a idade e a variabilidade individual das árvores e ainda devido à influência de diferenças nos fatores ecológicos a uma micro-escala. A padronização permite que séries de anéis de crescimento de diferentes amostras possam ser comparadas, removendo essas variações.

A padronização consiste na transformação de séries de anéis de crescimento não estacionárias em estacionárias. A cada série individual é ajustada uma função. De acordo com Cook (1987), as funções ajustadas podem ser lineares, exponenciais negativas ou polinomiais. No entanto, as curvas polinomiais não são recomendadas para o ajuste de tendências, pois trata-se de um modelo que se adapta ao comportamento da série, não se tratando de um modelo relativo à idade, não tendo em consideração o fator idade.

Através da divisão entre o crescimento medido (espessura do anel) e o valor ajustado dado pela função obtém-se um índice adimensional (Fowler, 1988), representado na equação 1, que representa a resposta da árvore ao clima (Cook e Kairiukstis, 1992).

$$(1) I_t = \frac{W_t}{F_t}$$

onde: I representa o valor indexado, W a espessura do anel, F o valor da função ajustada e t o ano.

As funções ajustadas na presente dissertação foram regressões lineares ou curvas exponenciais negativas, consoante a melhor adequabilidade à série de crescimento.

Após a determinação das curvas indexadas individuais de uma determinada região, procede-se ao cálculo da média das mesmas, de onde se obtém uma curva indexada para a região, que representa assim a cronologia do local (Lauw, 2011).

Depois da determinação da cronologia local para as três regiões em estudo, procedeu-se ao cálculo dos indicadores estatísticos das cronologias, de modo a aferir se a região apresenta ou não, influência climática. Os indicadores utilizados na presente dissertação foram os seguintes:

- Sensibilidade média

A sensibilidade média é um indicador da resposta da árvore a fatores ambientais. A espessura dos anéis de crescimento varia entre os anos, criando um padrão. Se este padrão refletir as variações do fator ambiental mais limitante para o crescimento da árvore os anéis de crescimento são designados sensitivos. Nos casos em que a árvore não está a crescer em condições de stress ambiental, os anéis tendem a apresentar uma menor variabilidade e então são designados complacentes (Lauw, 2011).

A sensibilidade média é calculada comparando a espessura do anel de um determinado ano com a espessura do anel do ano seguinte e é dada pela seguinte expressão (equação 2) (Leal, *et al.*, 2008):

$$(2) m_{sx} = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

Onde: x_t e x_{t+1} , são, respetivamente o valor indexado da cronologia local para um determinado ano, e para o ano seguinte, e n o número de anos.

- Sinal expreso da população (EPS)

O sinal expreso da população quantifica quão bem uma cronologia criada a partir de um número finito e específico de árvores representa a cronologia hipotética perfeita. Considera-se que no caso de valores acima de 0,85 a cronologia pode ser utilizada para estudos estatísticos em dendroclimatologia (Brice *et al.*, 2013).

O indicador é calculado através da seguinte fórmula (equação 3) (Leal *et al.*, 2008):

$$(3) EPS = \frac{r_{eff}}{r_{eff} + \frac{1 - r_{eff}}{n}}$$

Onde: r_{eff} representa o sinal efetivo da cronologia, e n o número de anos.

Por sua vez, o sinal efetivo da cronologia entra em conta com os coeficientes de correlação dentro e entre árvores (Leal *et al.*, 2008), e calcula-se da seguinte forma (equação 4) (Cook e Kairiukstis, 1992):

$$(4) \ r_{eff} = \frac{r_{bt}}{r_{wt} + \frac{1-r_{wt}}{c}}$$

Onde: r_{bt} representa o sinal inter-árvore que é obtido pela média dos coeficientes de correlação calculados para todos os pares possíveis de séries obtidas para as diferentes árvores do mesmo local, r_{wt} , representa o sinal intra-árvore, que é obtido pela média dos coeficientes de correlação calculados entre as séries indexadas da mesma árvore, para todas as árvores.

4.4. Identificação do sinal climático

Posteriormente, a identificação do sinal climático com recurso às cronologias locais foi determinada com base nos coeficientes de correlação de *pearson* com recurso ao *software SPSS statistic*, utilizando níveis de significância de 0,05 e 0, 01. O esquema metodológico que resume o tratamento estatístico do presente trabalho encontra-se exposto na figura 4.4.

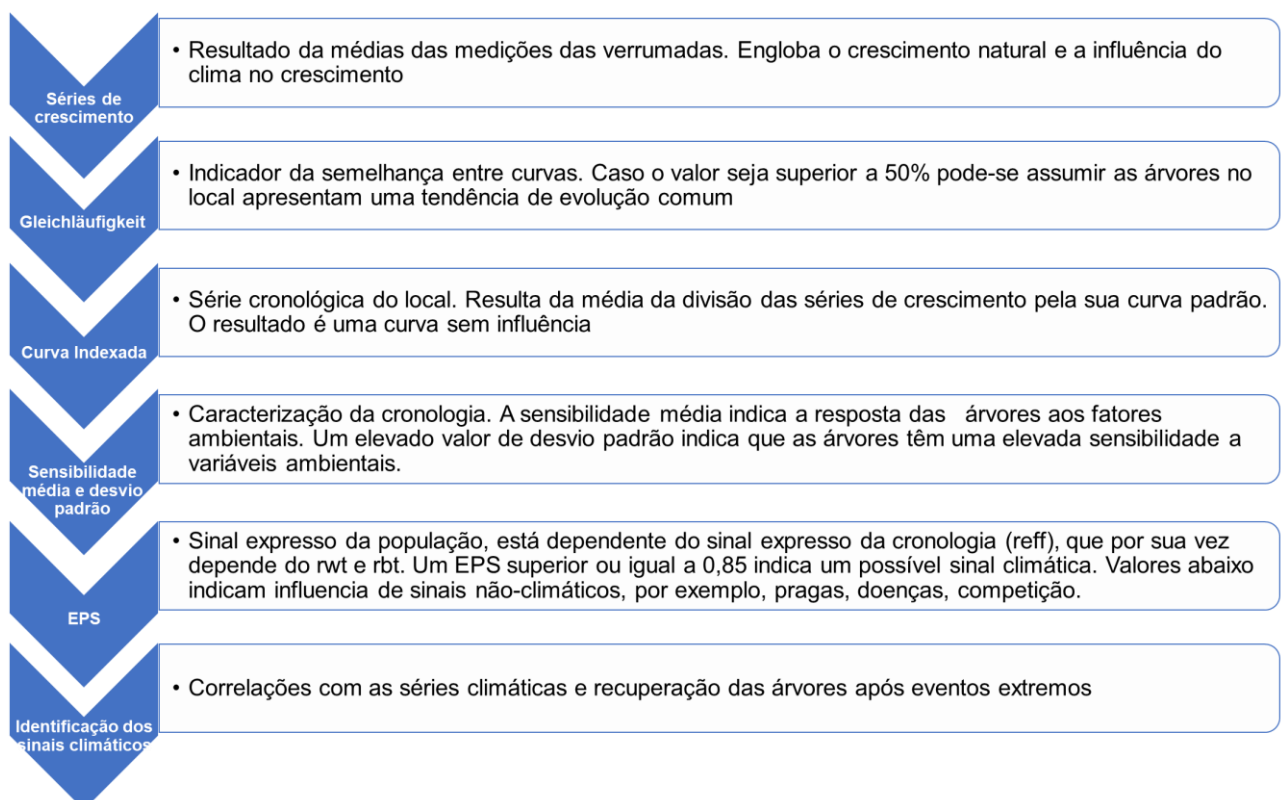


Figura 4.4. Esquema metodológico utilizado no tratamento estatístico

Os valores de temperatura e precipitação foram obtidos através do trabalho de Palma (2017), disponível no seguinte link <http://home.isa.utl.pt/~joaopalma/projects/agforward/clipick/>. A fonte escolhida para a obtenção dos dados foi a HadRM3Q0_A1B, uma vez que o autor refere que é a melhor que se adequa ao contexto português.

De modo a determinar a forma como os eventos extremos influenciaram o crescimento dos anéis anuais de crescimento, foi determinada, de seguida, a variação da espessura do anel criado tendo em conta a espessura do anel formado no ano anterior. Pasho *et al.* (2011) referem que a resposta das árvores à seca varia de espécie para espécie e também varia consoante o local.

4.5. Modelo de influência climática no desenvolvimento dos anéis anuais de crescimento

Dado que existem vários cenários climáticos que descrevem a forma como o clima pode variar, torna-se importante analisar o possível comportamento do crescimento das duas espécies em estudo influenciado pelo clima previsto. Desta forma, foi utilizado o modelo determinístico não linear *Veganov-Shashkin-Lite* (VS-Lite) que reflete o crescimento dos anéis de crescimento anual com base no clima verificado (Tolwinski-Ward *et al.*, 2011). Este modelo foi aplicado no *software Octave* e encontra-se disponível no *link* <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/reports/all?dataTypeld=59&search=true>.

O modelo referido requer como *input* a latitude, a temperatura mensal e a precipitação mensal acumulada, dando como *output* a cronologia do local para os anos de simulação. Este modelo utiliza como base o princípio dos fatores limitantes, transpondo a influência da temperatura e da precipitação para crescimento. Fatores biológicos não são tidos em conta, no entanto, a influência não linear do clima é devido aos limiares de crescimento que cada espécie apresenta em cada região (Tolwinski-Ward *et al.*, 2011).

Embora, inicialmente o modelo tivesse sido planeado para responder às variáveis climáticas norte americanas, Acevedo *et al.* (2012) e Breitenmoser *et al.* (2014) concluíram que o modelo pode ser aplicado a outras regiões.

Para um dado mês s e ano t , o crescimento é dado pela seguinte equação ((5):

$$(5) \quad g(s, t) = g_E(s, t) * \min\{g_T(s, t), g_M(s, t)\}$$

Onde, $g_E(s, t)$ representa o crescimento devido à insolação, $g_T(s, t)$ o crescimento devido à temperatura, e $g_M(s, t)$ o crescimento devido à humidade presente no solo.

Posteriormente, é realizado o somatório para os crescimentos mensais de modo a obter-se a espessura do anel anual de crescimento. A série de crescimento obtida para os vários anos em análise é padronizada, para assim ser obtida a cronologia simulada do local.

O crescimento devido à insolação, g_E , é calculado através de aproximações trigonométricas com base no rácio entre média mensal da duração do dia (L) em relação ao mês do solstício de verão na latitude correspondente (equação 6).

$$(6) \quad g_E(s) = \frac{L(s)}{\max\{L(s)\}}$$

O crescimento devido à temperatura, g_T , e o crescimento devido à humidade presente no solo, g_M , são obtidos através das equações não lineares 7 e 8, respetivamente.

$$(7) \quad g_T(s, t) = \begin{cases} 0 & \text{se } T(s, t) \leq T_1 \\ \frac{T(s, t) - T_1}{T_2 - T_1} & \text{se } T_1 \leq T(s, t) \leq T_2 \\ 1 & \text{se } T(s, t) \geq T_2 \end{cases}$$

$$(8) \quad g_M(s, t) = \begin{cases} 0 & \text{se } M(s, t) \leq M_1 \\ \frac{M(s, t) - M_1}{M_2 - M_1} & \text{se } M_1 \leq M(s, t) \leq M_2 \\ 1 & \text{se } M(s, t) \geq M_2 \end{cases}$$

Onde T_1 e M_1 representam os limiares para qual a temperatura e a humidade presente no solo não permitem o crescimento, e T_2 e M_2 representam o valor mínimo de temperatura e humidade no solo, respetivamente, para qual, o crescimento é ótimo. O presente modelo calcula estes parâmetros com base na latitude e em valores de temperatura, precipitação e valores indexados já conhecidos através de estimação *bayesiana* (Tolwinski-Ward *et al.*, 2013). Os valores de precipitação são transformados diretamente no modelo através do modelo *CPC Leaky Bucket* (Tolwinski-Ward *et al.*, 2011).

Os valores de temperatura e precipitação previstos foram obtidos através do trabalho de Palma (2017) para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 disponíveis. A esquematização do funcionamento do modelo encontra-se na figura 4.5.

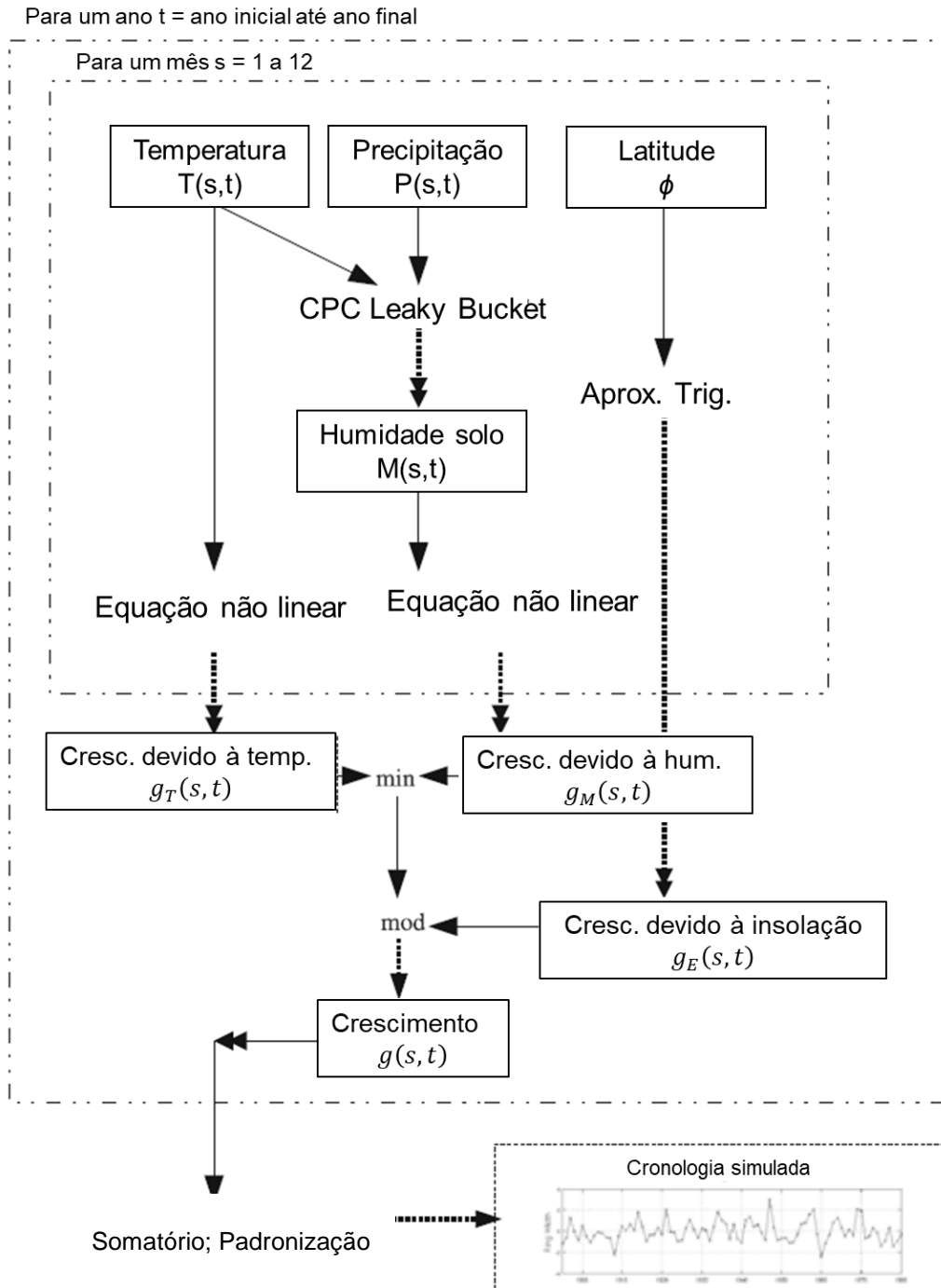


Figura 4.5. Esquematização do funcionamento do modelo VS-Lite (adaptado de Tolwinski-Ward et al., 2011)

5) Resultados e Discussão

5.1. Séries de crescimento

A tabela 5.1 apresenta, para cada local, o número de árvores admitidas para análise, o intervalo de tempo, bem como a variação dos valores do índice GLK. O número de árvores admitidas varia consoante o local pois algumas amostras foram perdidas, danificadas ou não apresentavam as condições adequadas para um correto estudo dendrocronológico.

De uma forma geral, o período de análise vai desde os anos 60 até à atualidade, havendo, assim, uma gama cronológica de 50 anos. Ou seja, as árvores amostradas são relativamente jovens, sendo, por isso, mais suscetíveis à influência do clima do que árvores de idade mais avançada (Carrer e Urbinati, 2004). O uso de árvores jovens é possível neste tipo de estudos, desde que se esteja ciente destas limitações, que poderão introduzir ruído. Por outro lado, torna-se necessária uma maior amostragem, em comparação com o uso de árvores mais antigas (Esper *et al.* 2008).

A maior parte dos locais apresenta o valor de GLK superior a 50%, o que significa que estas séries são passíveis de serem usadas no estudo dendroclimatológico. Apenas dois locais referentes ao Pinheiro-bravo (HA2 e AN3) apresentam um índice inferior a 50%, facto que deveria excluí-los da análise. No entanto, estas amostras foram mantidas na análise, pois com as restantes árvores os valores do índice eram suficientemente altos para as considerar. Se o valor considerado é alto, não há erros, mas ficam-se com menos amostras.

Tabela 5.1. Número de árvores consideradas no tratamento estatístico, intervalo temporal das séries e índice GLK

Região	Espécie	Local	Nº de árvores admitidas	Data inicial	Data final	GLK (%)
Leiria	Pinheiro-Bravo	L1	4	1978	2010	70,0-86,7
		L30	5	1965	2011	65,0-83,9
	Pinheiro-Manso	L252	12	1967	2015	61,9-92,7
Península de Setúbal	Pinheiro-Bravo	PF2	4	1944	2011	54,1-69,4
		HA1	6	1954	2011	51,9-78,0
		HA2	4	1964	2013	40,9-68,6
		HA3	5	1952	2012	53,7-70,6
		HA6	4	1962	2012	52,6-73,8
		HA7	5	1953	2012	56,8-76,3
	Pinheiro-Manso	HA8	15	1961	2014	60,0-90,2
Sudoeste Alentejano	Pinheiro-Bravo	CT1	3	1970	2012	71,7-80,0
		CT2	3	1969	2012	62,5-77,6
		AN1	4	1974	2012	58,3-74,1
		AN3	4	1972	2013	40,5-71,4
		PC1	4	1962	2012	57,1-72,7
		PC2	4	1992	2012	50,0-86,4
		PC3	5	1961	2012	60,0-94,4
		PC4	4	1956	2012	68,2-77,3
		PC5	5	1965	2012	60,5-82,9
		PC6	5	1964	2012	65,6-83,8
		PC7	5	1962	2012	55,0-73,2
	Pinheiro-Manso	ANPM	9	1969	2015	50,0-91,3

No conjunto de figuras seguintes (figura 5.1 à figura 5.22) encontram-se representadas as séries de anéis de crescimento das árvores amostradas (média dos valores das duas verrumadas de cada árvore).

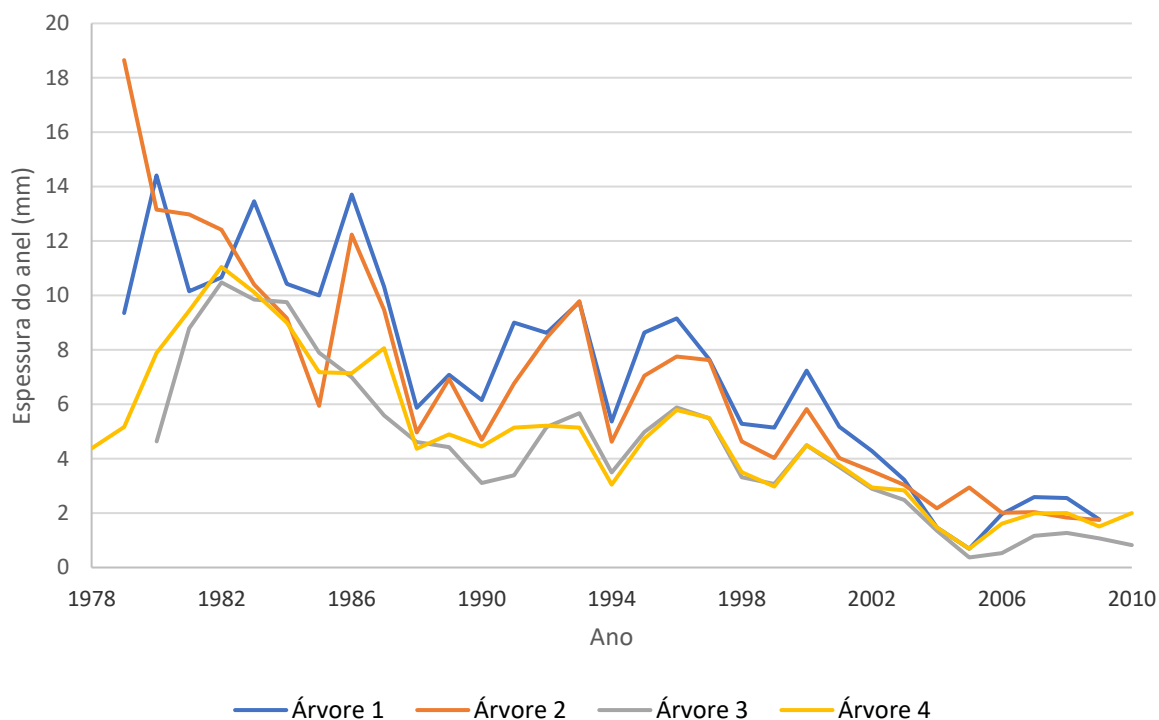


Figura 5.1. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo em Leiria (L1)

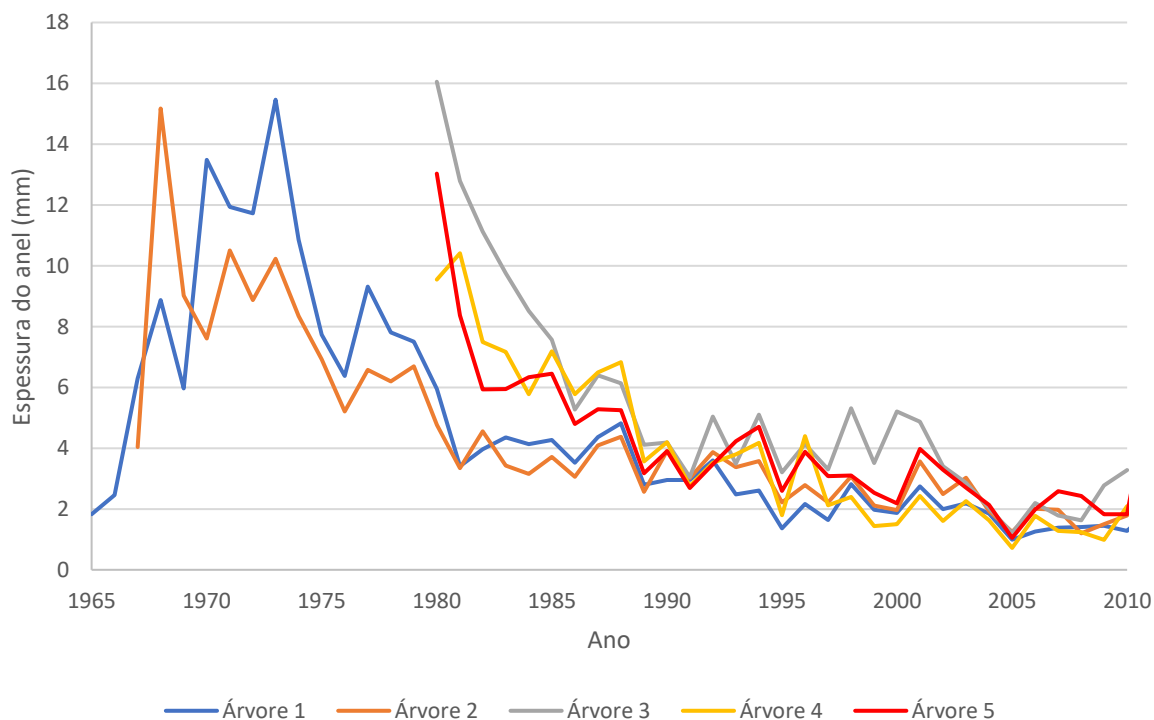


Figura 5.2. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo em Leiria (L30)

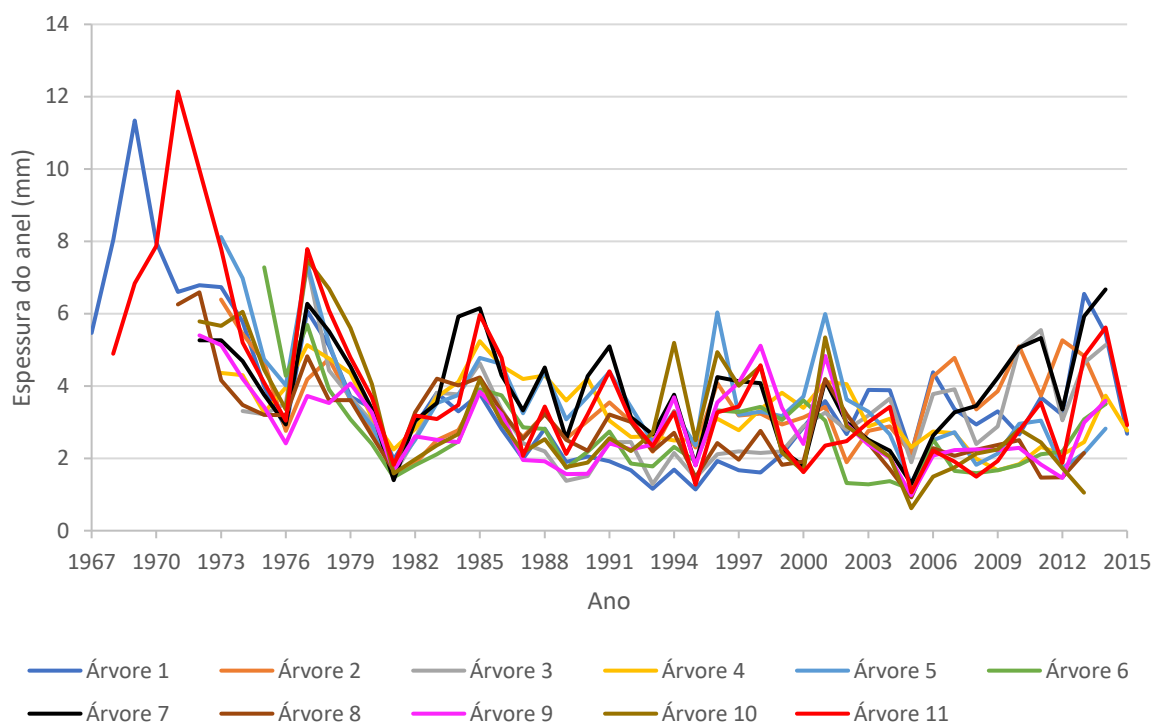


Figura 5.3. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Manso em Leiria (L252)

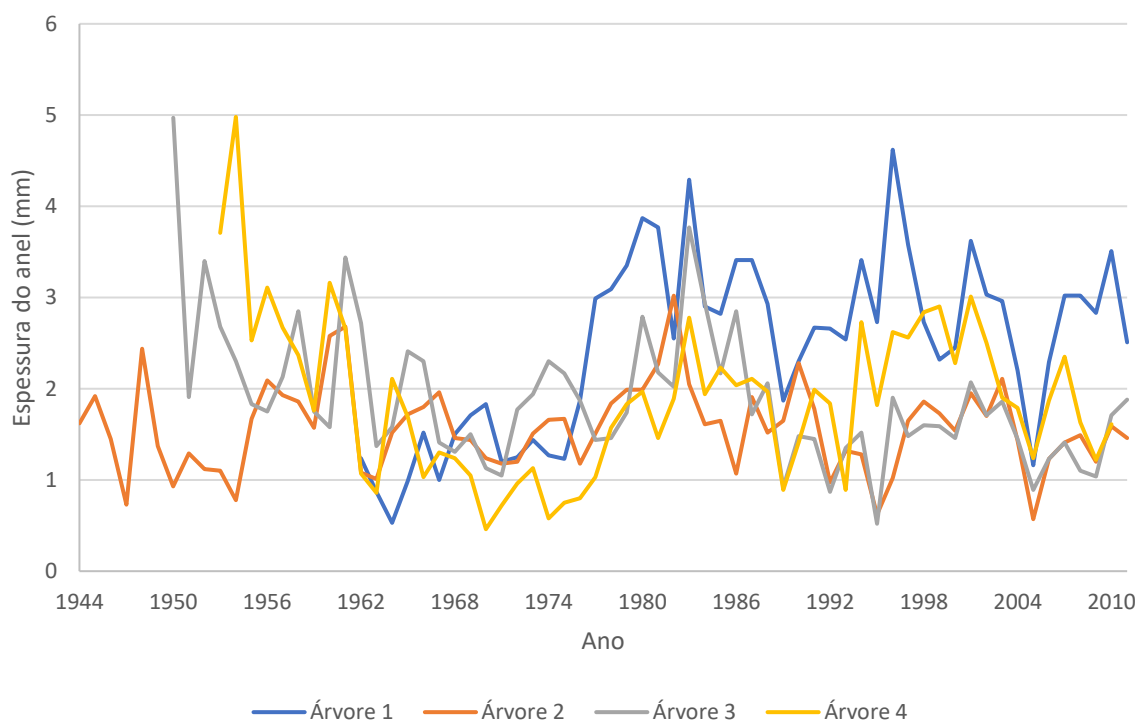


Figura 5.4. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro Bravo na Península de Setúbal (PF2)

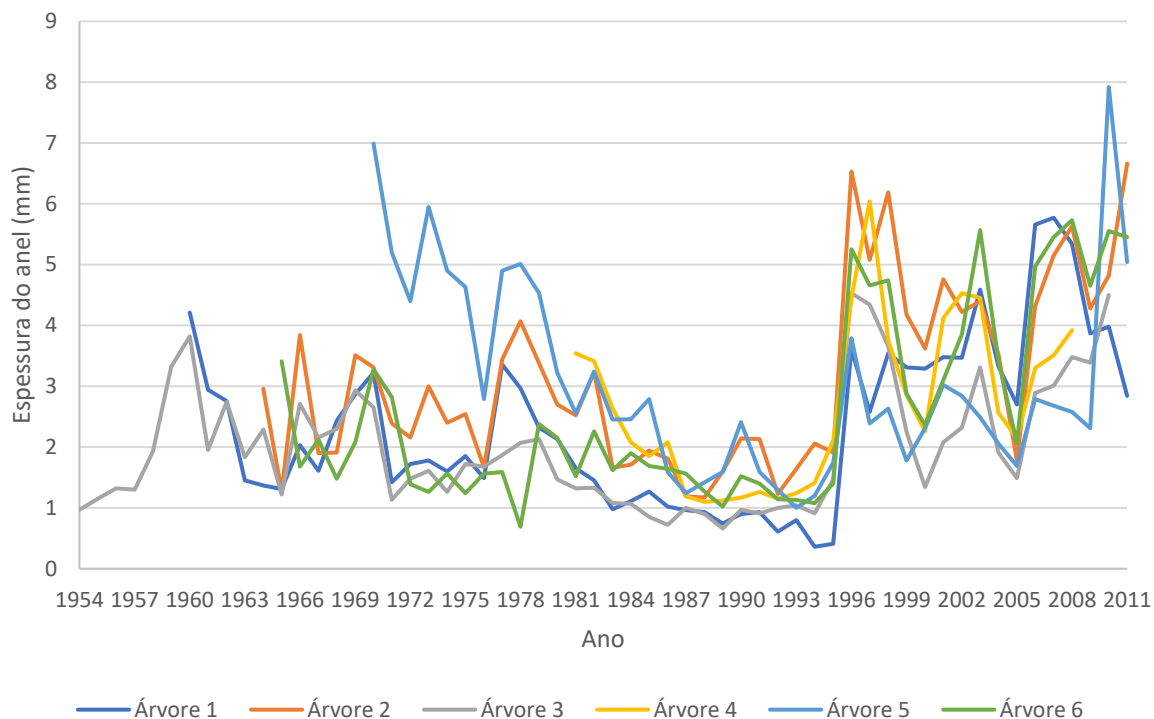


Figura 5.5. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA1)

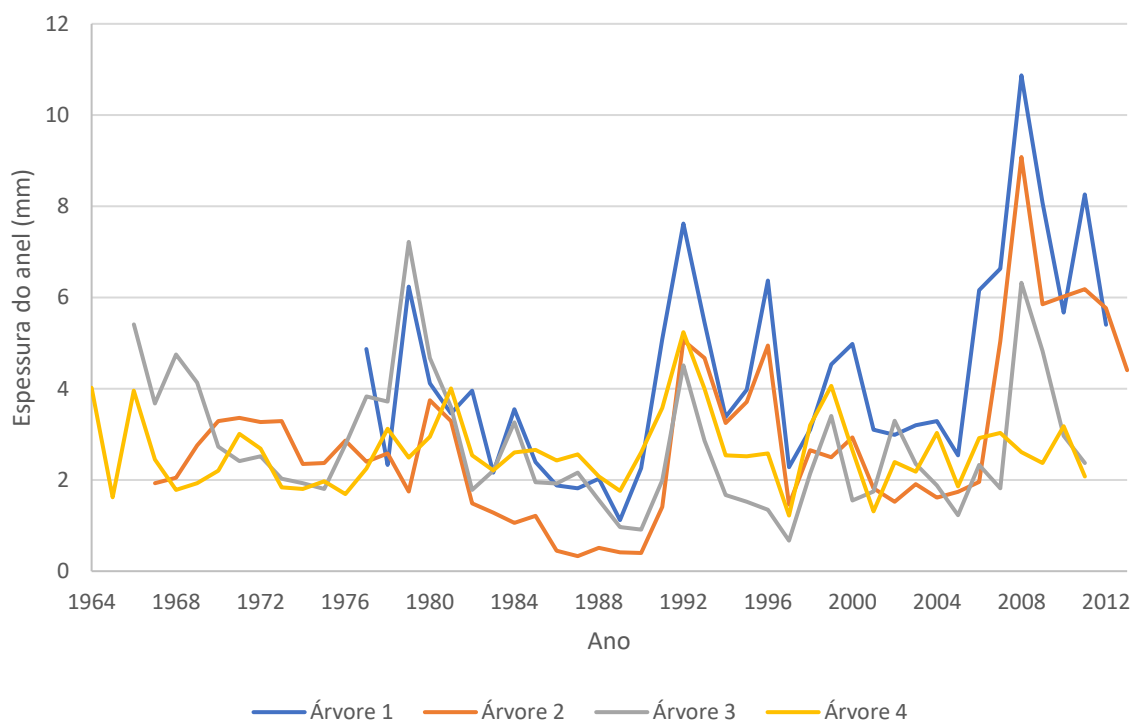


Figura 5.6. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA2)

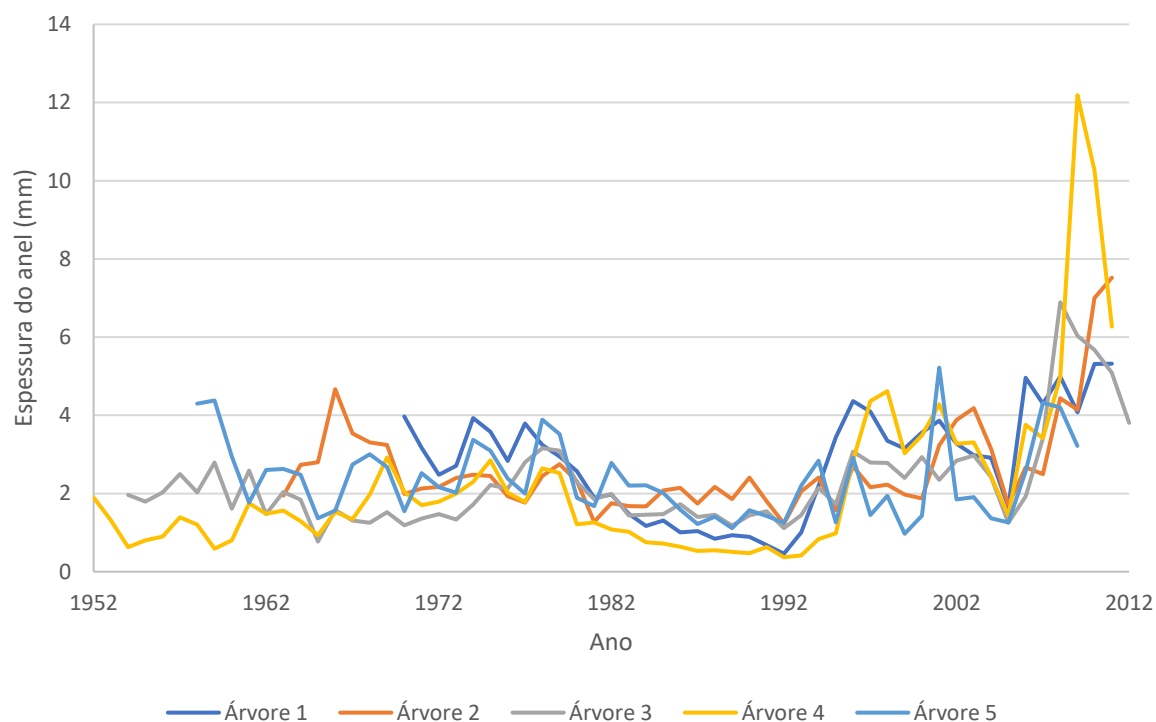


Figura 5.7. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA3)

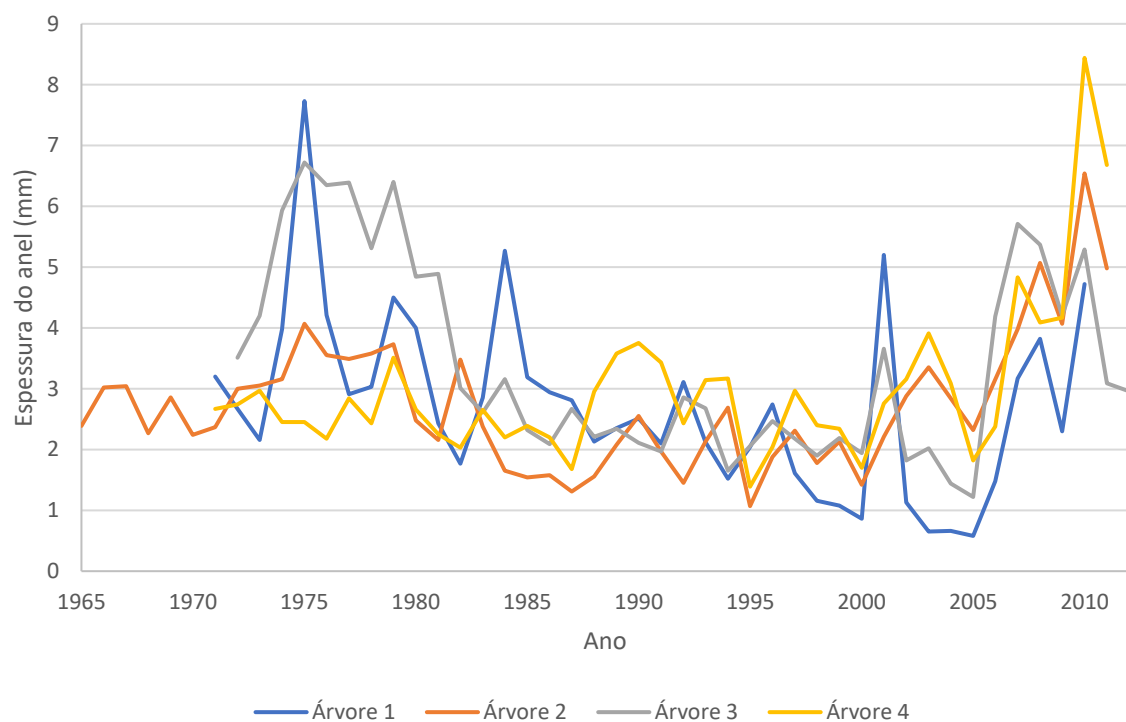


Figura 5.8. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA6)

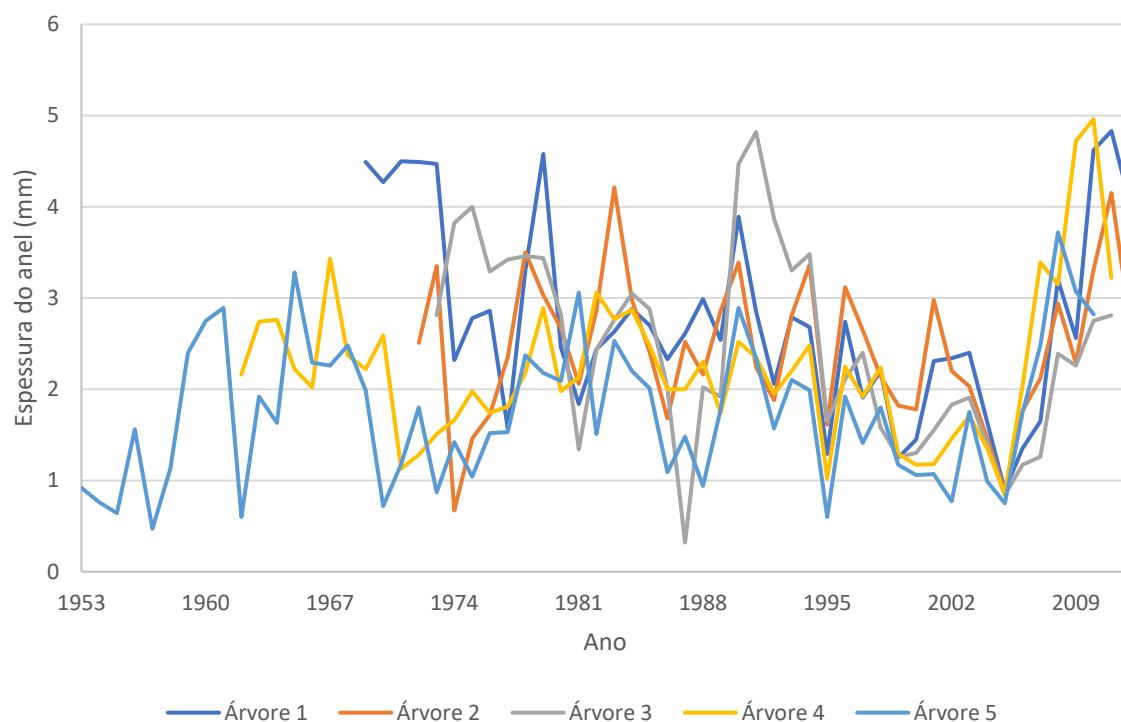


Figura 5.9. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal (HA7)

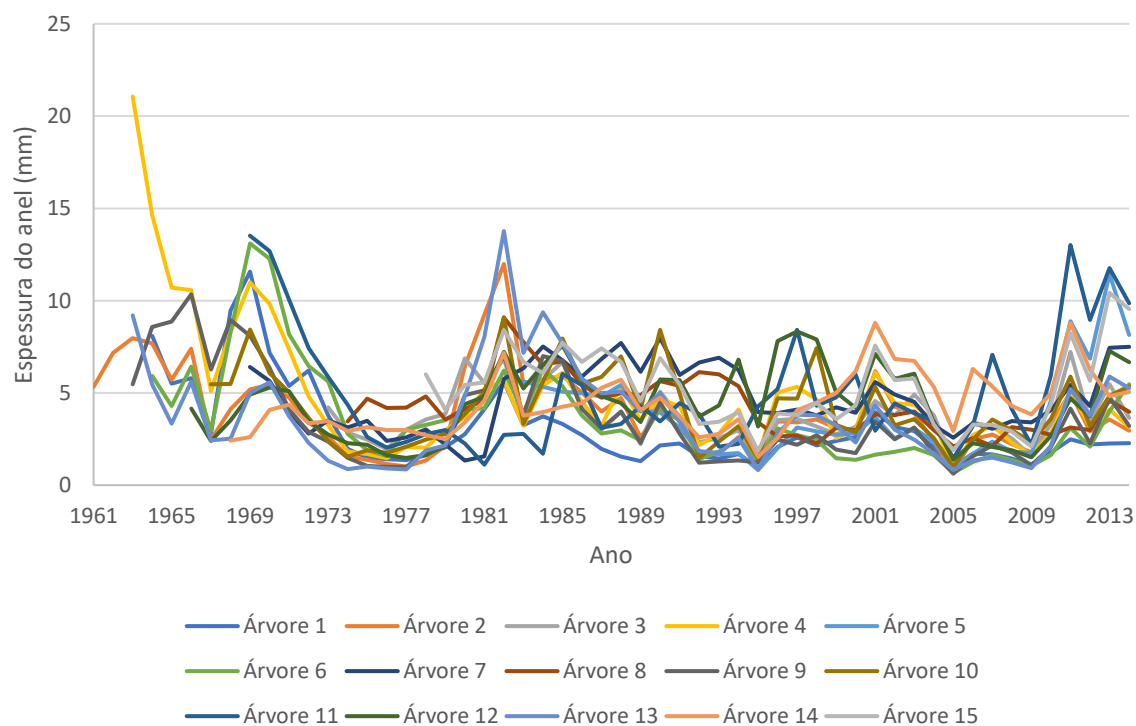
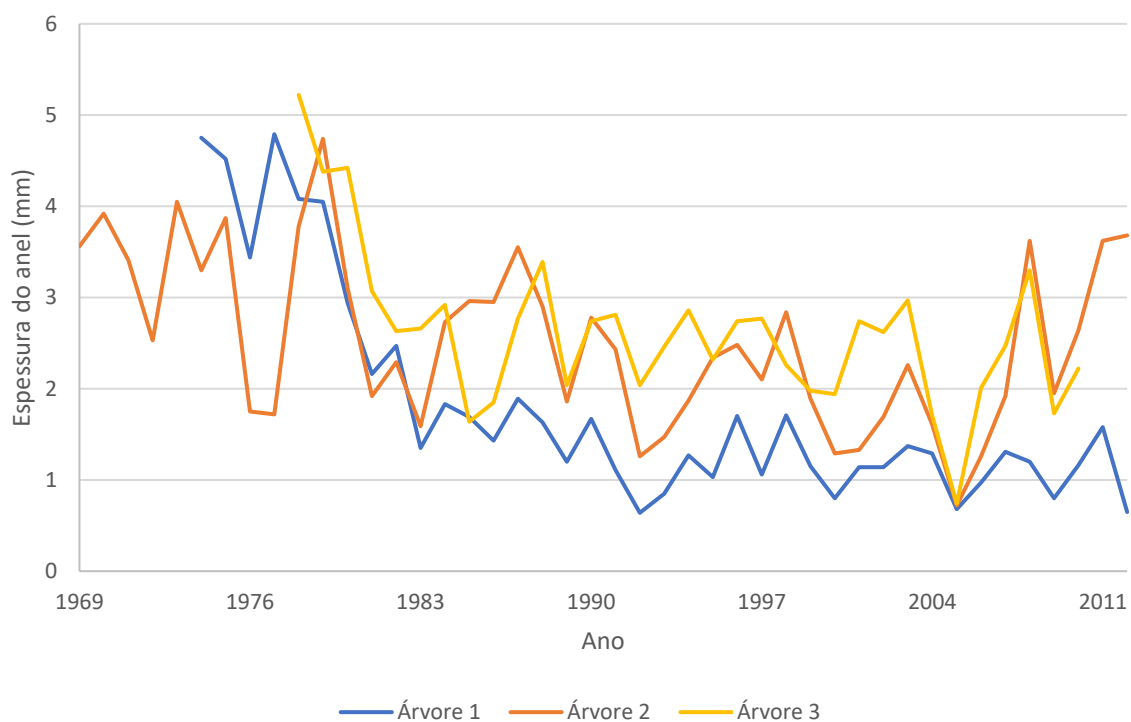
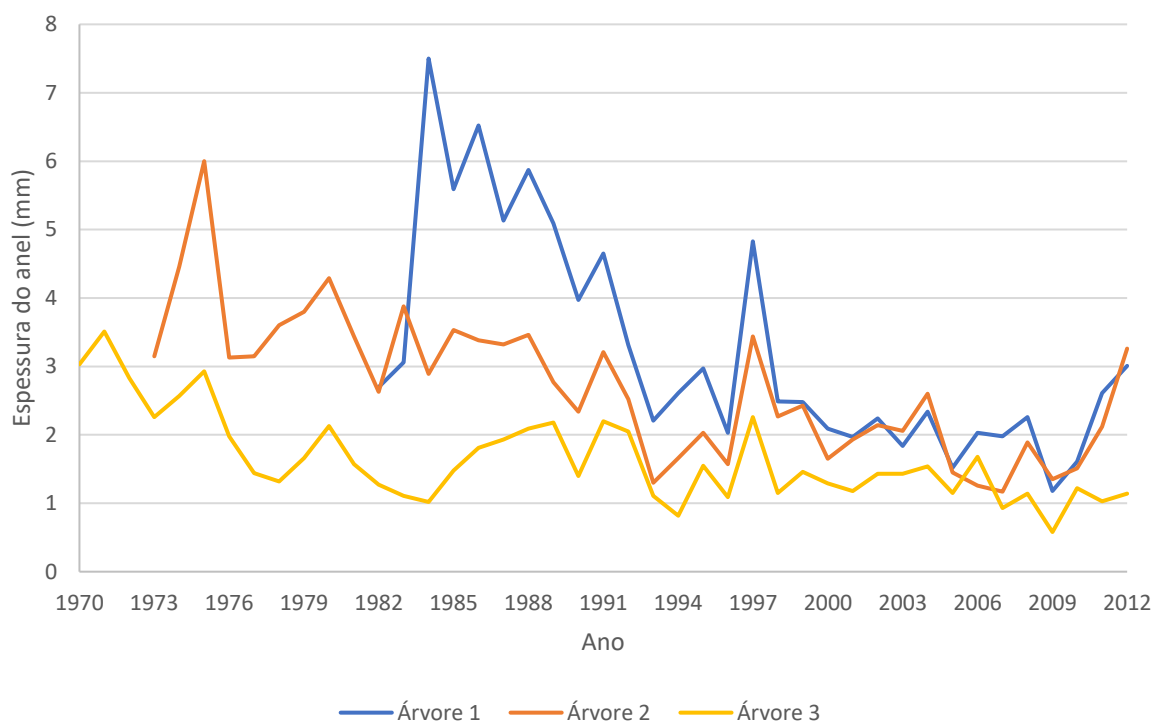


Figura 5.10. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Manso na Península de Setúbal (HA8)



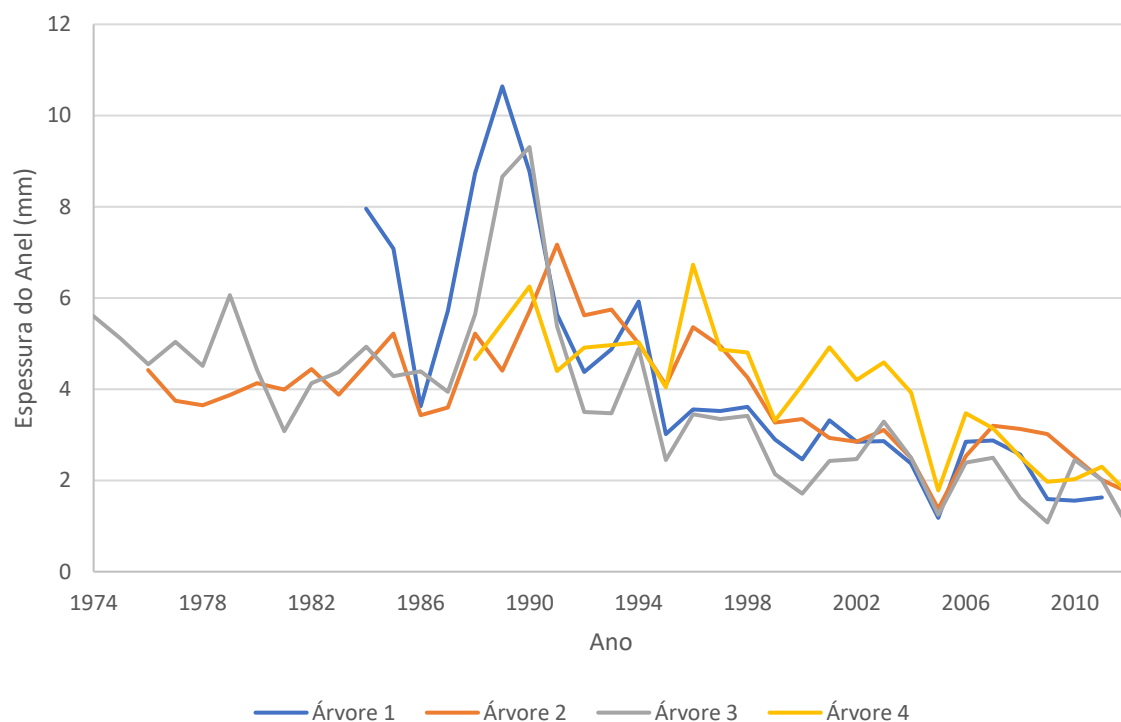


Figura 5.13. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (AN1)

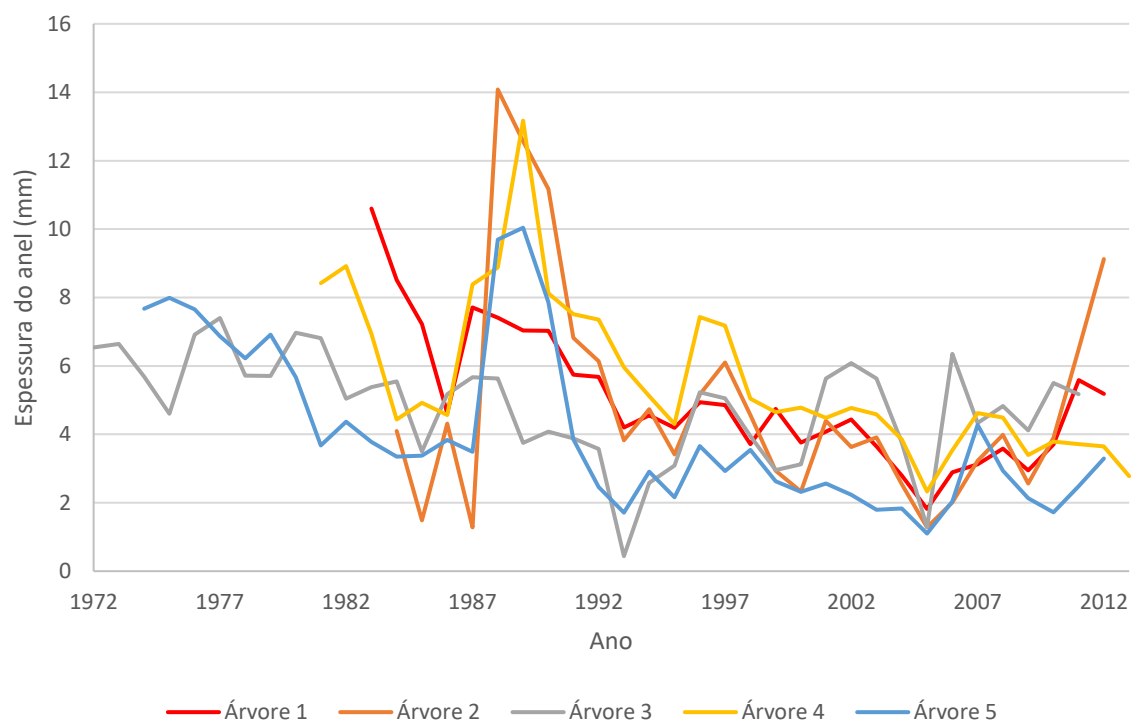
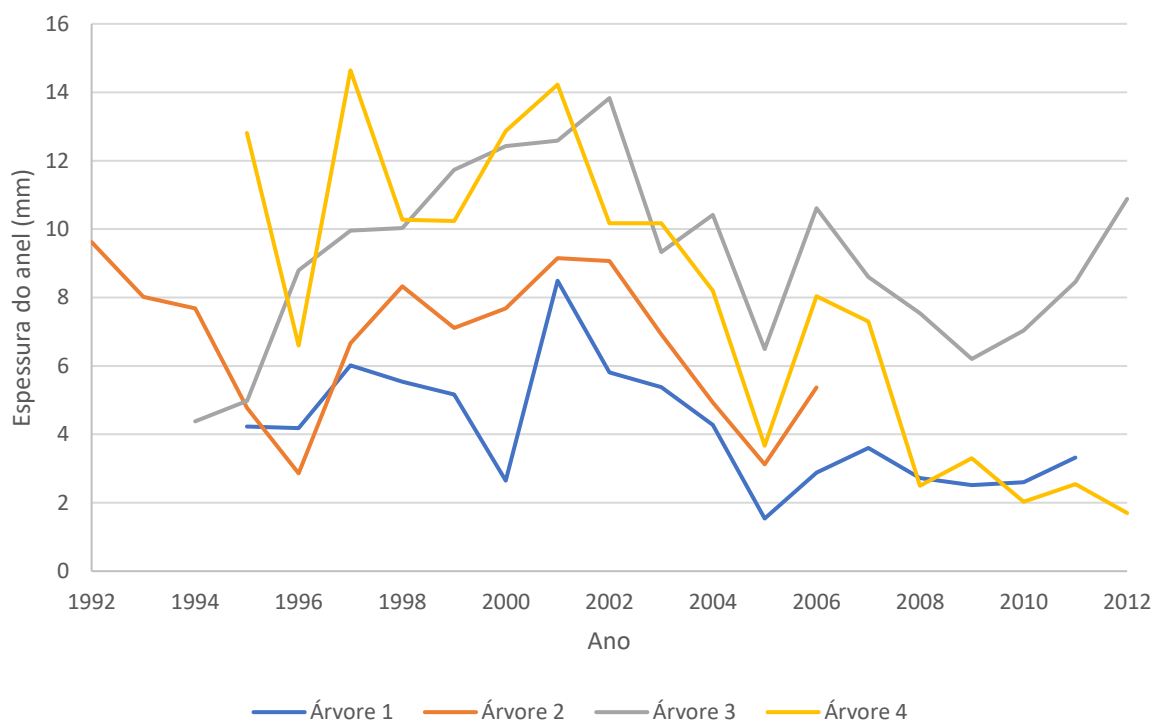
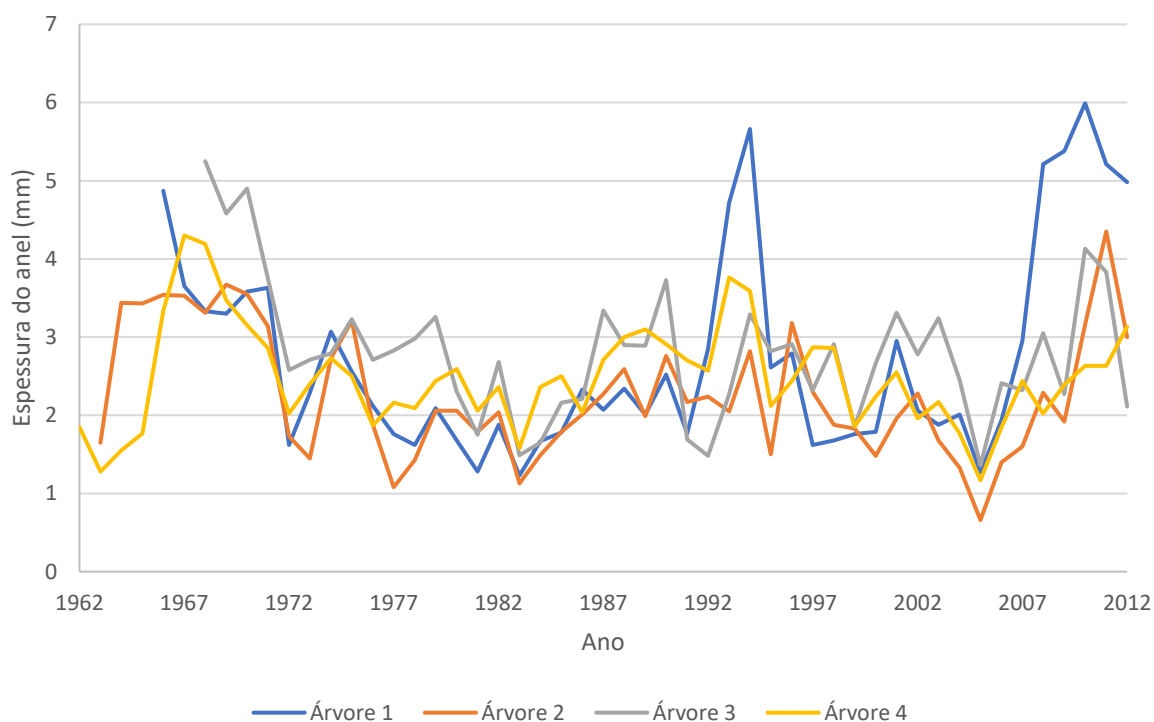


Figura 5.14. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (AN3)



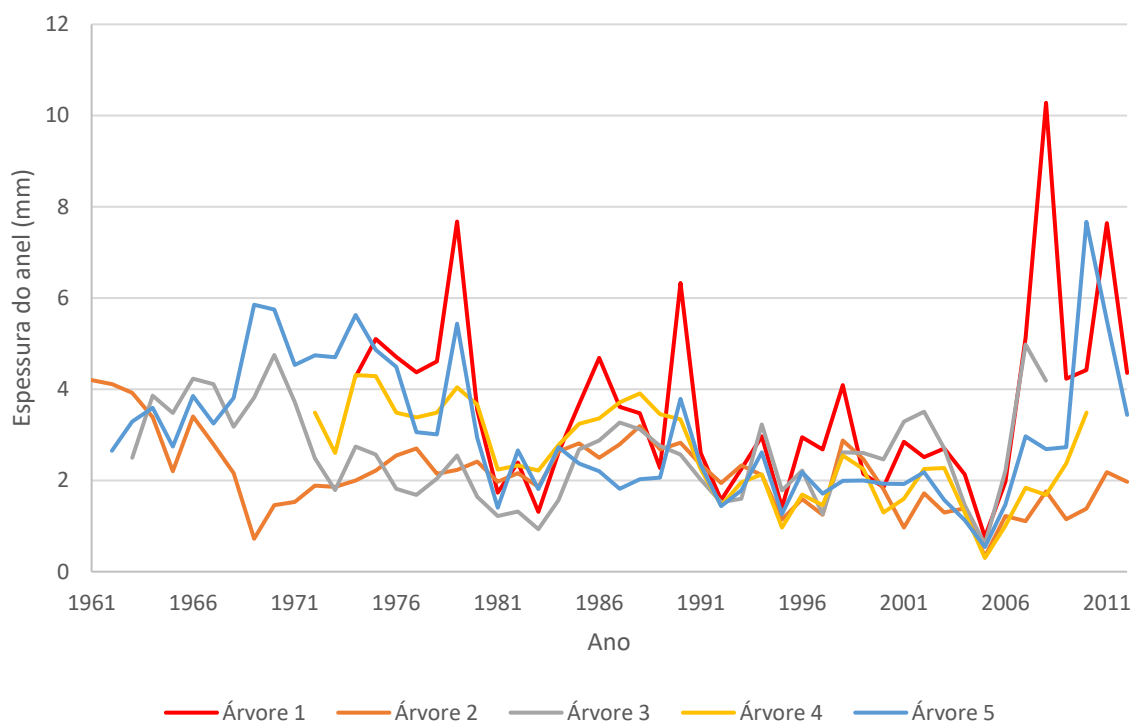


Figura 5.17. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC3)

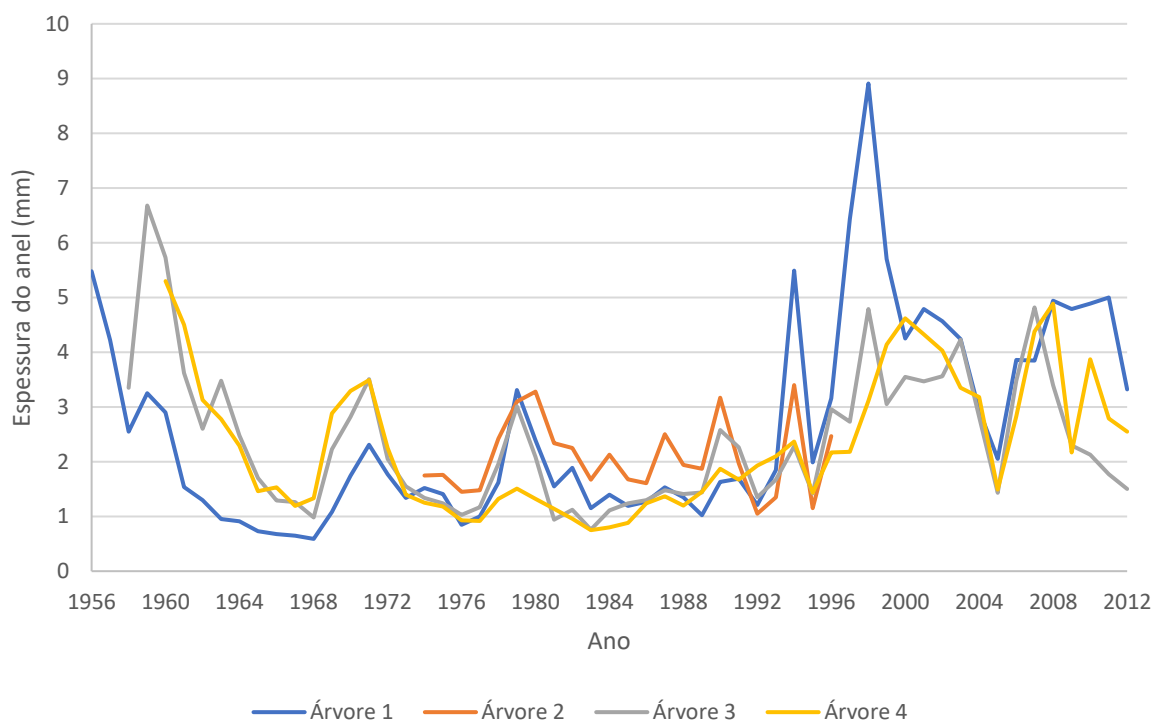


Figura 5.18. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC4)

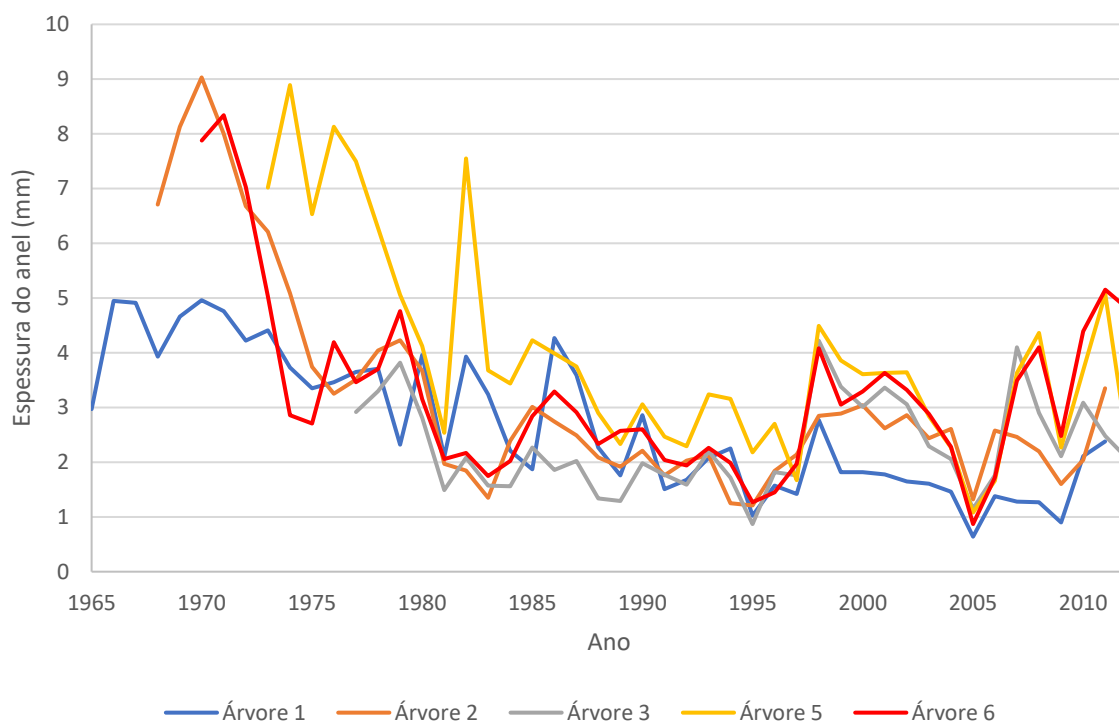


Figura 5.19. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC5)

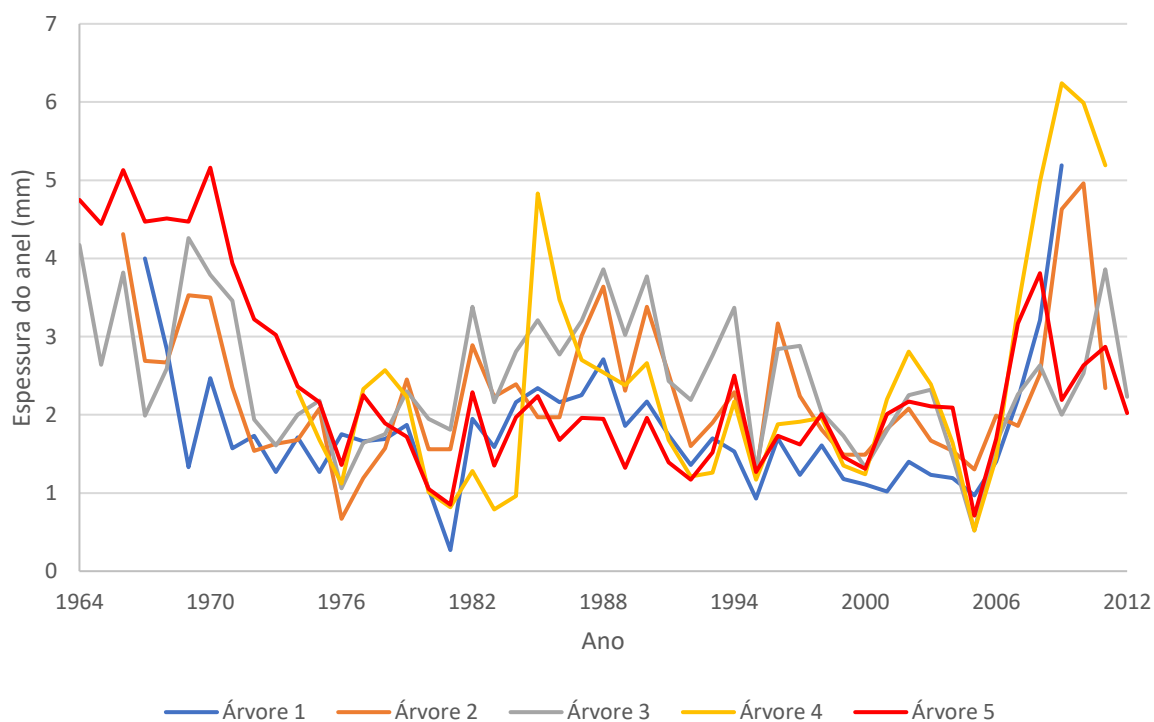


Figura 5.20. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC6)

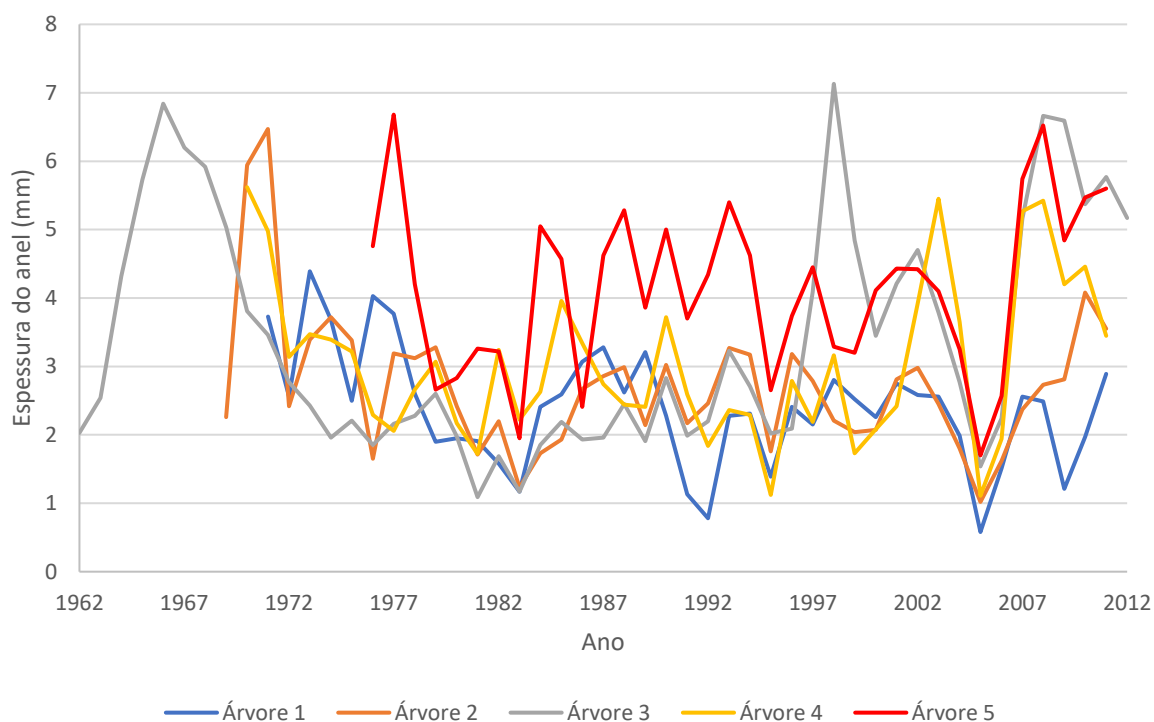


Figura 5.21. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano (PC7)

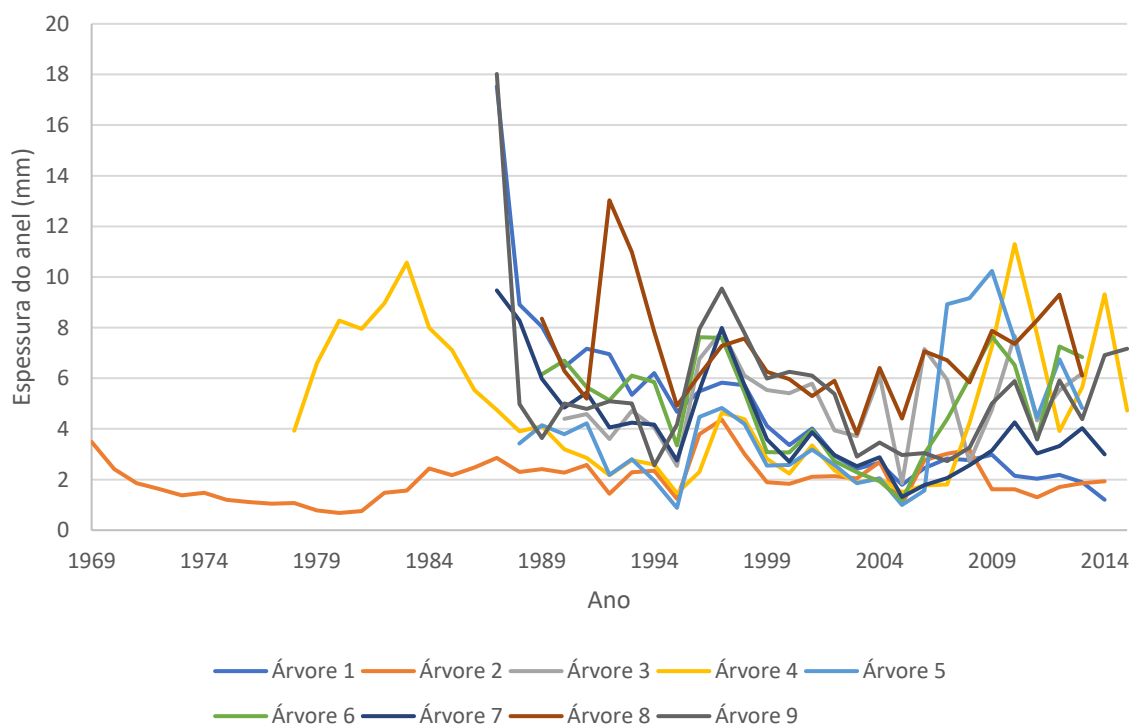


Figura 5.22. Séries de anéis de crescimento para as árvores de Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano (ANPM)

Verifica-se, de uma forma geral, que, ao longo dos anos, a espessura dos anéis vai diminuindo. De fato, a partir da idade adulta há uma tendência natural de decréscimo do crescimento da árvore (Esper *et al.*, 2008).

A análise visual das séries de crescimento revela também a existência de anos indicadores, ou seja, anos em que uma elevada percentagem de árvores do mesmo local apresenta uma mesma tendência de evolução significativa, tanto crescente como decrescente (Lauw, 2011). Torna-se então possível assumir que um fator específico influenciou o crescimento das árvores naqueles anos. É o caso, por exemplo, de 2005, um dos anos de seca mais severa em Portugal continental. Em todas as séries nota-se um decréscimo acentuado e brusco no crescimento neste ano.

É possível verificar ainda com base nas figuras anteriores que as séries de anéis de crescimento de todos os locais apresentam um padrão semelhante, até mesmo no caso de árvores mais jovens (figura 5.16). Esta informação é consistente com valores superiores a 50% do índice GLK (tabela 5.1).

A semelhança no padrão de crescimento e a possibilidade de recorrer à datação cruzada com recurso aos anos indicadores tornam possível uma primeira abordagem do impacto do clima no desenvolvimento das árvores. Assim sendo, verifica-se que se pode tornar viável um estudo dendroclimatológico, dada a capacidade das árvores selecionadas reterem a informação climática aquando da formação dos seus anéis.

Os anéis anuais de Pinheiro-Bravo apresentam maior espessura na região de Leiria (tabela 5.2), o que está de acordo com a sua distribuição preferencial (figura 2.1), a norte do Tejo. De forma semelhante Nabais *et al.* (2014), obtiveram na região mais a norte os maiores valores para a espessura média dos anéis anuais de Pinheiro-Bravo. O Pinheiro-Manso apresenta maior espessura nos anéis (tabela 5.2), nas regiões mais a sul, o que está de acordo com a sua distribuição preferencial a sul (figura 2.2).

Tabela 5.2. Espessura média dos anéis de crescimento (mm) por região

Região	Espécie	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
Leiria	Pinheiro-Bravo	4,96	3,33	0,37 (2005)	18,65 (1979)
	Pinheiro-Manso	3,36	1,57	0,62 (2005)	12,14 (1971)
Península de Setúbal	Pinheiro-Bravo	2,50	1,37	0,32 (1987)	12,19 (2009)
	Pinheiro-Manso	4,16	2,41	0,62 (2005)	21,06 (1963)
Sudoeste Alentejano	Pinheiro-Bravo	3,11	1,91	0,27 (1981)	14,64 (1997)
	Pinheiro-Manso	4,47	2,63	0,68 (1980)	18,02 (1987)

Uma vez que não eram cumpridos os pressupostos para se realizar uma ANOVA foi realizado o teste de Brown-Forsythe para verificar se existem diferenças significativas entre as médias da espessura dos anéis de crescimento entre as diferentes regiões, para as duas espécies (tabela 5.3).

Tabela 5.3. Resultado dos testes para aferir a diferença entre médias da espessura dos anéis das espécies consoante a região

Brown-Forsythe	
Pinheiro-Bravo	0,000
Pinheiro-Manso	0,000

Tendo em conta que, para ambos os testes, o valor do teste foi inferior a 0,05, verifica-se que existe pelo menos uma média diferente. Deste modo, realizou-se o teste de Games-Howell para aferir qual o par que apresenta diferença estatística no respeitante à espessura média dos anéis de crescimento (tabela 5.4).

Tabela 5.4. Valor do teste Games-Howell

	Pinheiro-Bravo	Pinheiro-Manso
Leiria – Península de Setúbal	0,000	0,000
Leiria – Sudoeste Alentejano	0,000	0,000
Península de Setúbal – Sudoeste Alentejano	0,000	0,206

Com base na tabela 5.4 verifica-se que a espessura média dos anéis de crescimento para o Pinheiro-Bravo difere entre as 3 regiões em estudo ($p\text{-value} < 0,05$), ou seja, observa-se uma resposta diferente do Pinheiro-Bravo nas 3 regiões. No entanto, para o Pinheiro-Manso apenas se verifica uma diferença entre o crescimento a norte e o crescimento a sul. Já a sul, não se verifica uma diferença

estatística ($p\text{-value} > 0,05$) para a espessura média dos anéis de crescimento. Este resultado pode indicar que o crescimento do Pinheiro-Bravo está mais dependente do clima, sendo afetado negativamente, em zonas mais secas, enquanto o crescimento do Pinheiro-Manso está mais adaptado aos locais que coloniza, que são mais secos.

Verifica-se também (tabela 5.5) que a resposta ao clima é específica da espécie, uma vez que, em cada região, a média da espessura dos anéis de crescimento é diferente a nível estatístico ($p\text{-value} < 0,05$). Desta forma, podemos concluir que cada espécie possui uma resposta diferente ao clima.

Tabela 5.5. Resultado dos testes para aferir a diferença entre médias da espessura dos anéis para cada região consoante a espécie

	Leiria	Península de Setúbal	Sudoeste Alentejano
Brown-Forsythe	0,000	0,000	0,000

5.2. Cronologias

As figuras seguintes (figura 5.23 à figura 5.28) representam as curvas indexadas para as três regiões, para cada espécie de pinheiro. A área a verde representa o número de amostras utilizadas para o cálculo da cronologia.

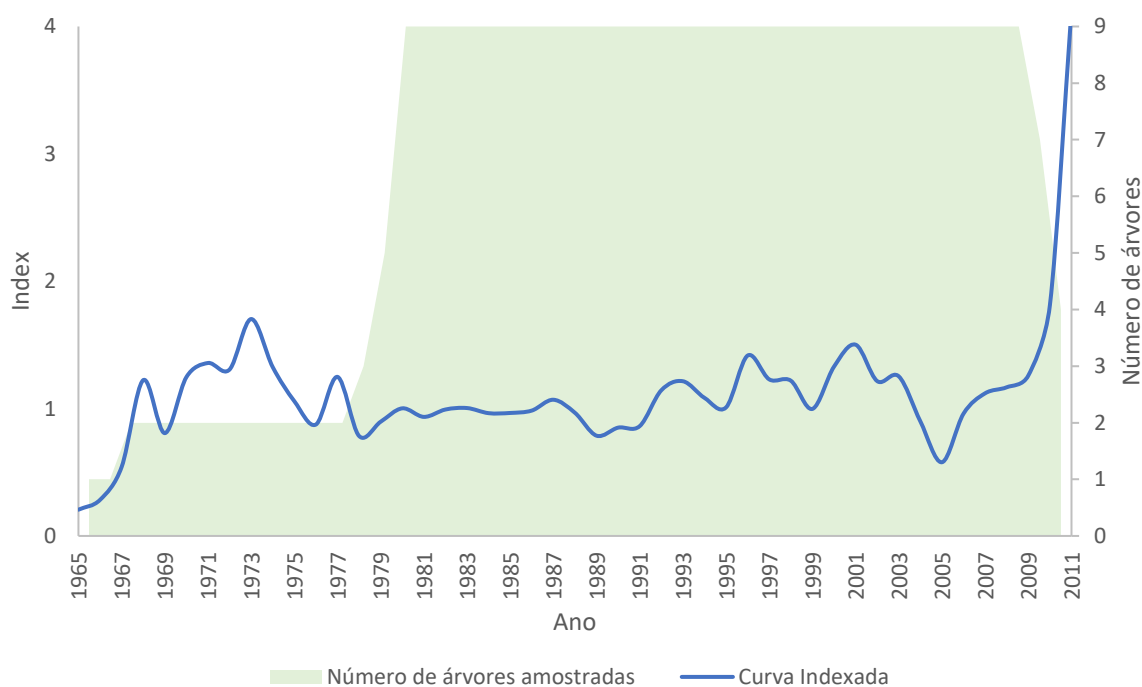


Figura 5.23. Curva Indexada para o Pinheiro-Bravo em Leiria

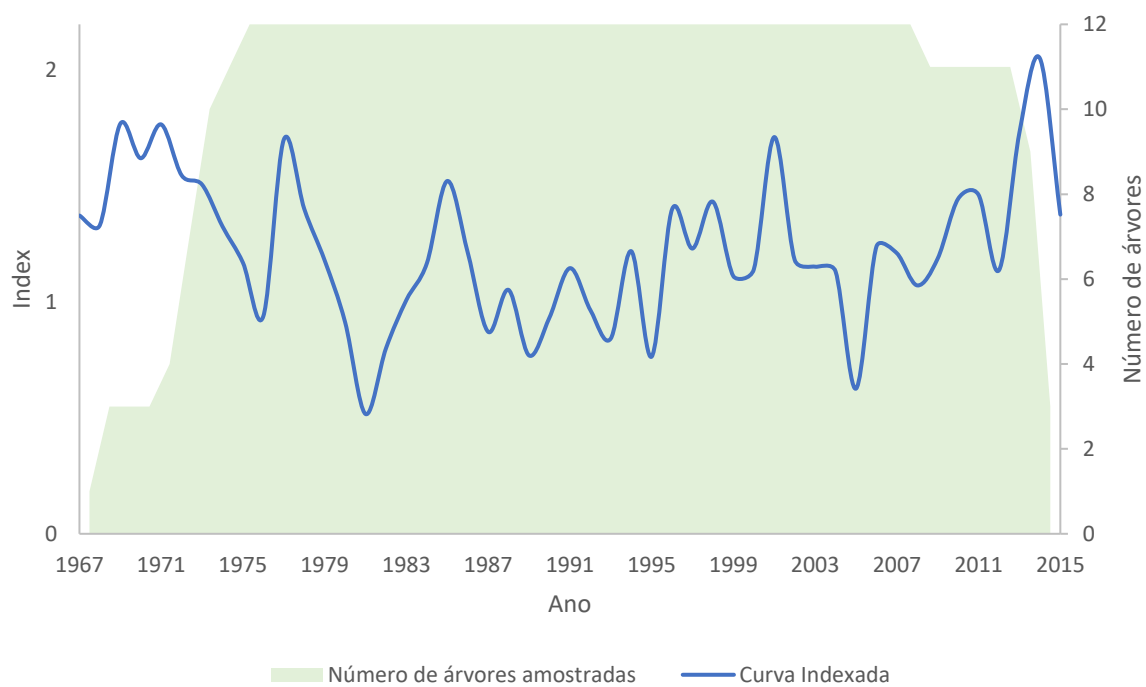


Figura 5.24. Curva indexada para o Pinheiro-Manso em Leiria

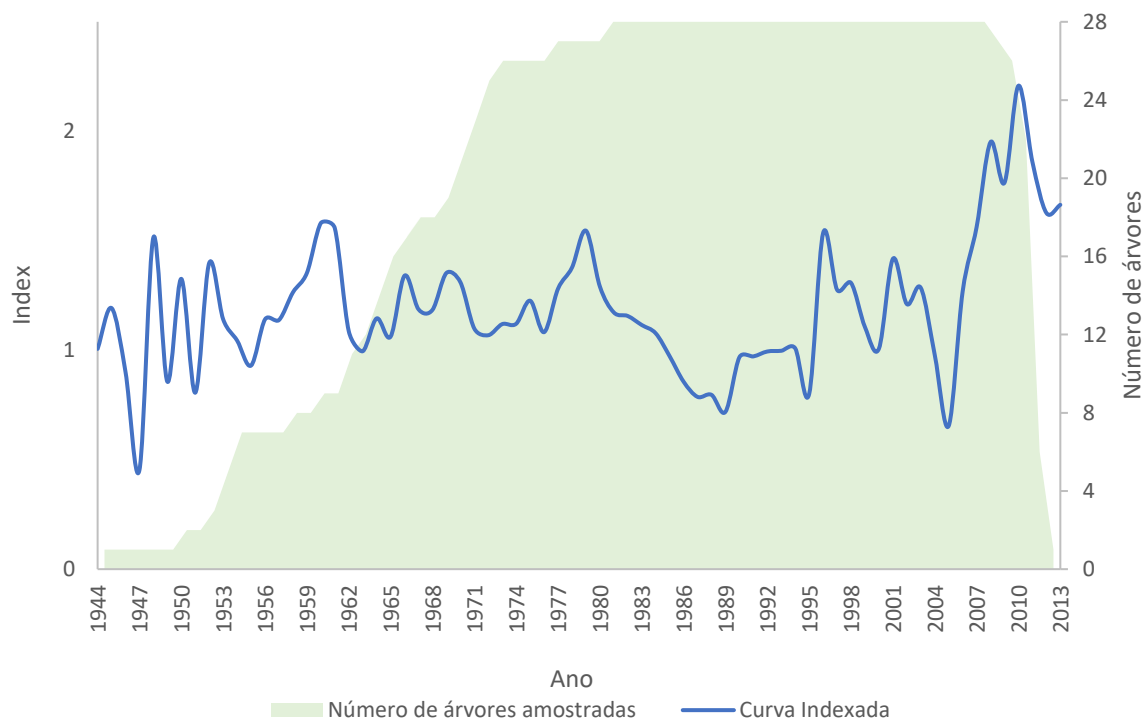


Figura 5.25. Curva Indexada para o Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal

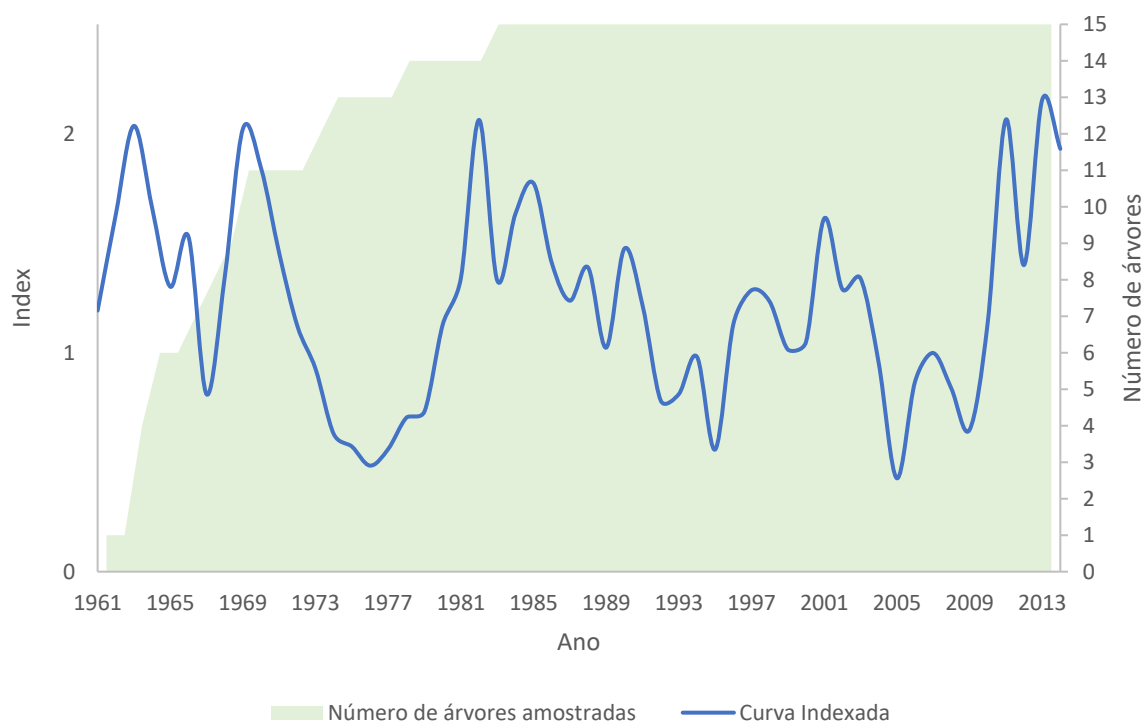


Figura 5.26. Curva Indexada para o Pinheiro-Manso na Península de Setúbal

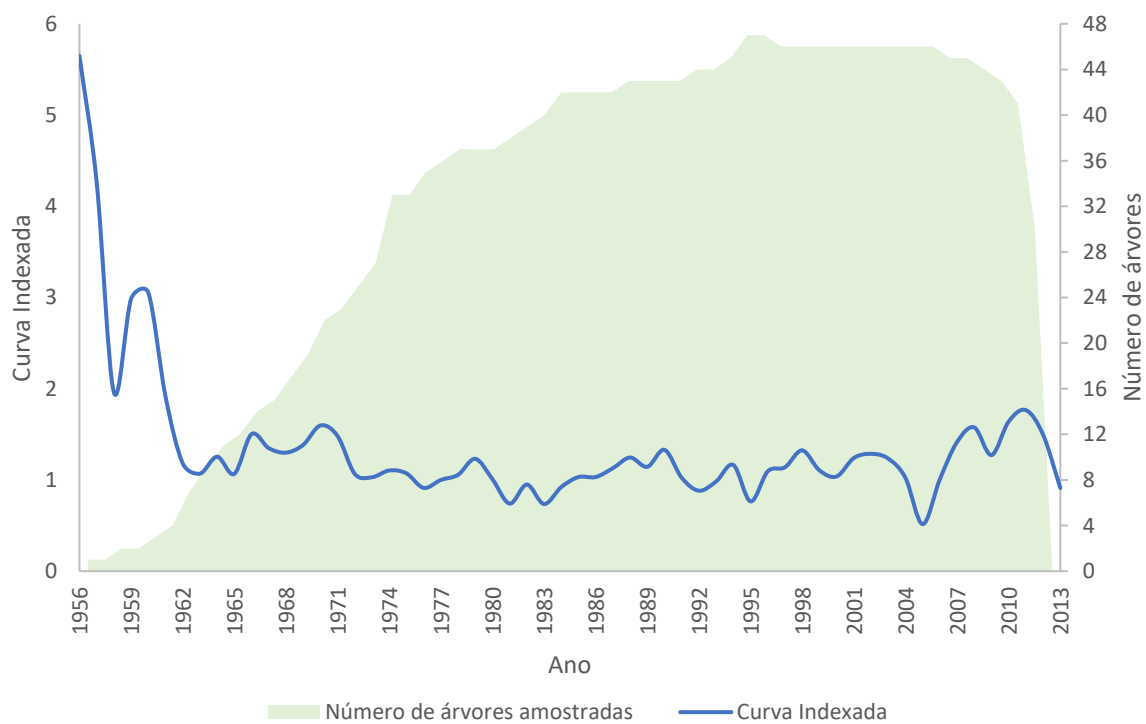


Figura 5.27. Curva Indexada para o Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano

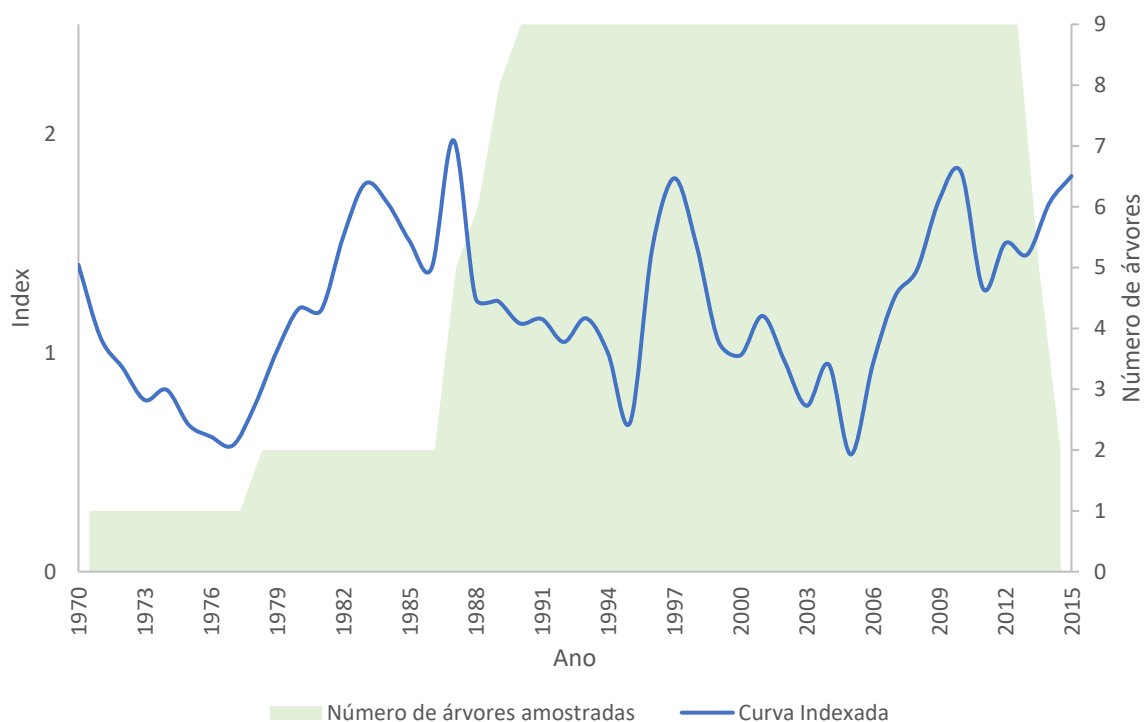


Figura 5.28. Curva Indexada para o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano

Nenhuma das curvas indexadas apresenta uma tendência linear, mostrando apenas picos máximos e mínimos de crescimento. Mais uma vez, constata-se, em anos de eventos extremos, por exemplo em 2005, um mínimo no crescimento. Globalmente, as curvas obtidas variaram entre 0 e 2, tendo um comportamento devido ao clima irregular o que indica que, para cada ano, o clima afetou de forma diferente o crescimento.

Com base nas curvas indexadas foram calculadas as estatísticas das cronologias (sensibilidade média, desvio padrão e EPS) para cada região que se encontram apresentadas na tabela 5.6.

Tabela 5.6. Estatística das cronologias por local

Região	Espécie	Sensibilidade Média	Desvio Padrão	EPS
Leiria	Pinheiro-Bravo	0,21	0,54	0,98
	Pinheiro-Manso	0,24	0,32	0,89
Península de Setúbal	Pinheiro-Bravo	0,18	0,31	0,92
	Pinheiro-Manso	0,28	0,45	0,95
Sudoeste Alentejano	Pinheiro-Bravo	0,20	0,82	0,95
	Pinheiro-Manso	0,20	0,39	0,86

Os valores obtidos para a sensibilidade média (tabela 5.6) encontram-se dentro do leque de valores obtidos noutros estudos realizados em regiões mediterrânicas (Nabais *et al.*, 2014; Piraino *et al.*, 2012; Raventós *et al.*, 2001; Vieira *et al.*, 2008). Como referido em Lauw (2011), valores elevados do desvio padrão, em comparação com os valores da sensibilidade média, traduzem-se numa elevada suscetibilidade às variáveis ambientais. Desta forma, o Pinheiro-Bravo aparenta ser a espécie mais sensível ao clima, exceto na Península de Setúbal onde possui os valores mais baixos para a sensibilidade média e para o desvio padrão.

A elevada sensibilidade do Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano, pode levar a uma maior suscetibilidade a outras variáveis não climáticas. O Pinheiro-bravo, ao ser uma espécie de crescimento rápido, canaliza os seus metabolitos em prol do crescimento, em vez de canalizar para as suas defesas (Endara e Coley, 2011). Encontrando-se fragilizado em situações climáticas adversas torna-se alvo preferencial de pragas, o que pode explicar a sua elevada mortalidade na região (Pimentel *et al.*, 2017).

Os valores elevados para o EPS indicam que as cronologias obtidas apresentam um forte sinal climático. Com exceção da Península de Setúbal, o Pinheiro-Bravo aparenta ser a espécie que possui um maior sinal climático, o que também se verifica no trabalho de Nabais *et al.* (2014). Tendo isto em conta, as cronologias apresentam-se adequadas para o estudo dendroclimatológico da presente dissertação.

5.3. Identificação dos sinais climáticos nas cronologias

Com a utilização do *software SPSS statistics*, foi possível correlacionar as curvas indexadas com a temperatura média e a precipitação acumulada das estações do ano.

A figura 5.29 apresenta as correlações entre o crescimento de Pinheiro-Manso e a temperatura para as diferentes regiões em estudo. Verifica-se que para a região mais a sul existem mais correlações

e com valores mais elevados, especialmente para o inverno e primavera, indicando assim uma região mais propícia ao crescimento da espécie. No Sudoeste Alentejano verifica-se uma correlação positiva com o outono anterior ao crescimento, tal como Nabais *et al.* (2004), o que pode indicar um início prematuro do crescimento devido à temperatura elevada. Este fato não se verifica nem Leiria, pois a temperatura é mais baixa.

Em sentido contrário, verifica-se que o Pinheiro-Bravo apresenta correlações mais elevadas na região mais a norte, indicando uma região preferencial para esta espécie (figura 5.30). Para evitar os efeitos nefastos da temperatura elevada, o Pinheiro-Bravo fecha os seus estomas das folhas para assim evitar a perda de água o que afeta a fotossíntese. Consequentemente, ocorrerá um crescimento menor, o que se traduz nos resultados obtidos, comprovando que esta é uma espécie que evita os efeitos prejudiciais das secas (Nabais *et al.*, 2014). Tal explicação pode justificar os coeficientes negativos significativos, como acontece no verão para o Sudoeste Alentejano.

Em condições mais propícias ao crescimento, o Pinheiro-Manso apresenta correlações mais elevadas durante o inverno e primavera. O Pinheiro-Bravo, durante condições mais propícias, apresenta correlações positivas com o outono do ano anterior ao crescimento, reduz durante o inverno e volta a subir com a primavera. Esta situação pode indicar um crescimento mais rápido do Pinheiro-Bravo em relação ao Manso. Dado que em Leiria o Pinheiro-Bravo apresenta correlações significativas com o outono anterior ao crescimento e o outono durante o ano de crescimento, verifica-se um prolongamento do período propício ao crescimento.

O facto dos coeficientes de correlação apresentarem, essencialmente, valores positivos ao longo do ano, exceto nas regiões mais limitantes, não está de acordo com resultados obtidos em estudos realizados nas áreas em questão (Nabais *et al.*, 2014; Vieira *et al.*, 2008). No entanto Vieira *et al.*, (2008) referem que as árvores jovens têm um período de crescimento maior do que as árvores mais velhas, o que pode também explicar os resultados obtidos.

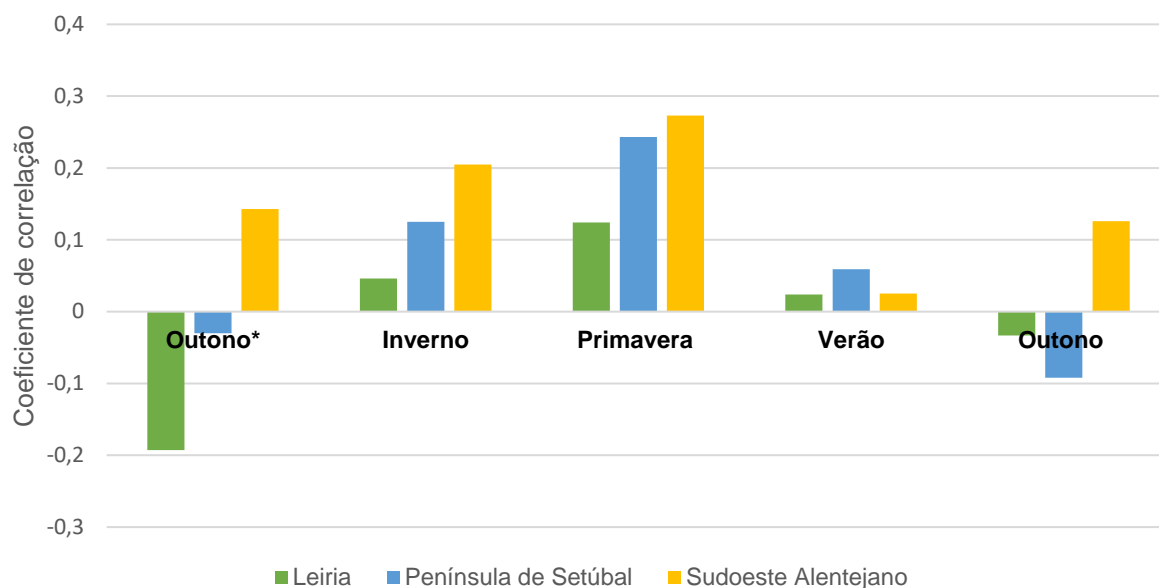


Figura 5.29. Correlação entre o crescimento e a temperatura para o Pinheiro-Manso. * Outono anterior ao crescimento

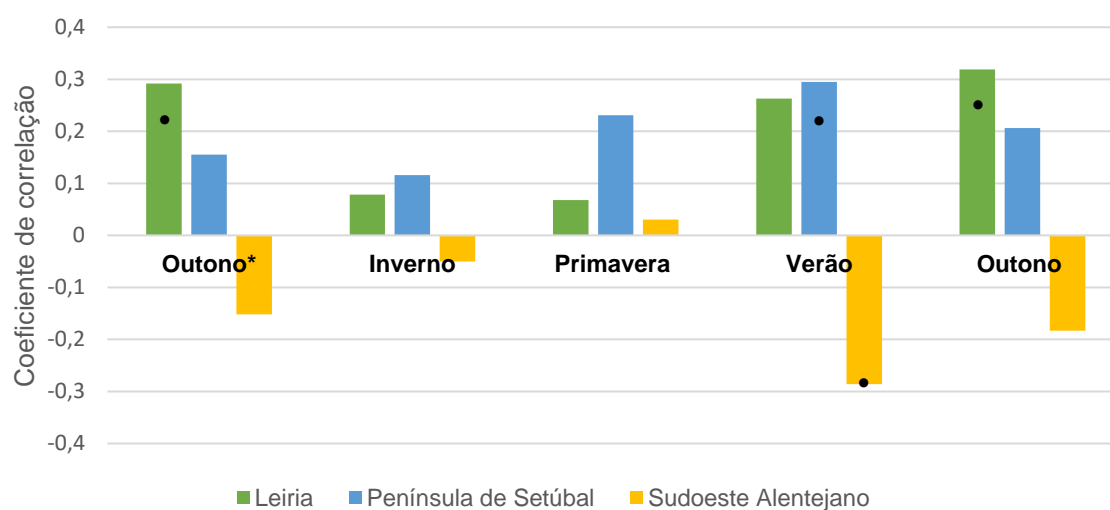


Figura 5.30. Correlação entre o crescimento e a temperatura para o Pinheiro-Bravo. * Outono anterior ao crescimento • Significância a 95%

O Pinheiro-Manso (figura 5.31) apresenta correlações positivas com a precipitação do outono anterior ao ano de crescimento, sendo significativa para a Península de Setúbal, e durante o inverno. Esta situação também é visível em outros trabalhos onde foram utilizados exemplares de Pinheiro-Manso (Nabais *et al.*, 2014; Piraino *et al.*, 2012).

A figura 5.32 apresenta os coeficientes de correlação entre o crescimento do Pinheiro-Bravo e a precipitação, ocorrendo os valores mais elevados para a precipitação do outono anterior ao ano de crescimento, de inverno, sendo significativa na Península de Setúbal e de verão. Nos primeiros dois casos, a precipitação é importante para humedecer os solos para ser possível o início do crescimento, e no último caso, é importante, pois permite controlar as perdas de água provenientes do aumento da temperatura.

As árvores conseguem armazenar os seus metabolitos em meristemas inativos. Em situações de falta de nutrientes existe uma paragem do crescimento, mas não da fotossíntese, o que explica a formação de glúcidos e posterior armazenamento (Herms e Mattson, 1992). Tendo isto em conta, é possível explicar o porquê das correlações com a precipitação do outono anterior ao crescimento. Uma vez que as correlações com a temperatura possuem valores baixos (Figura 5.29), durante o verão e o outono o crescimento é menor e, assim, os metabolitos são armazenados e utilizados nos meses de maior crescimento.

Nas mesmas regiões e utilizando árvores com mais idade Nabais *et al.* (2014) obtiveram correlações positivas significativas com os primeiros meses do ano, com valores elevados, tal como acontece com a correlação com a precipitação de inverno na Península de Setúbal. Uma possível explicação pode residir no facto das árvores mais jovens, ao terem uma taxa fotossintética maior (Esper *et al.*, 2008), terem uma preferência em usar os seus metabolitos armazenados para o crescimento.

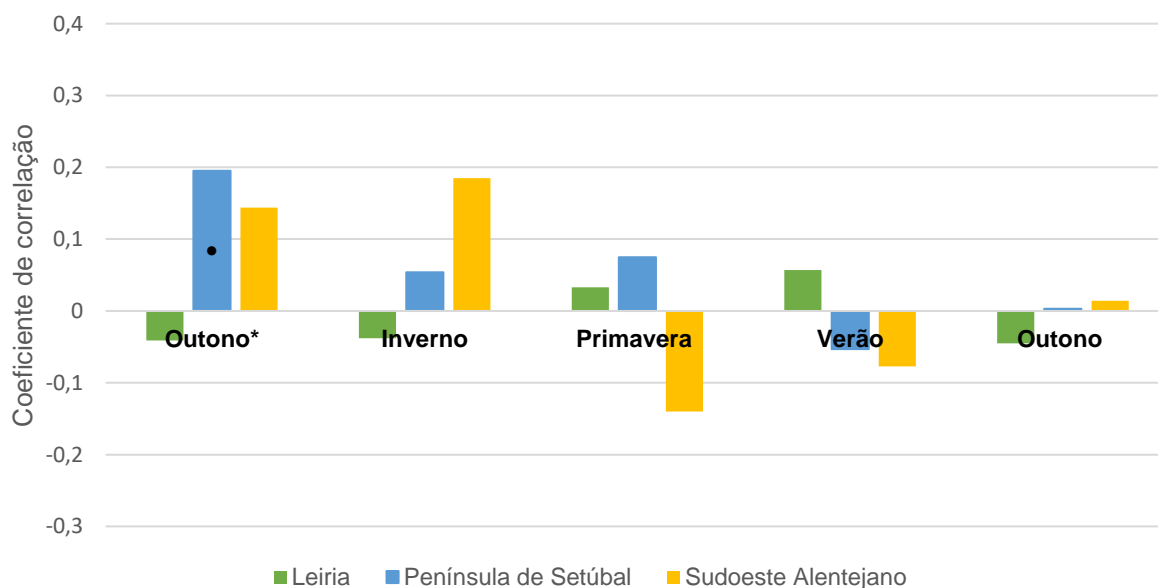


Figura 5.31. Correlação entre o crescimento e a precipitação para o Pinheiro-Manso. * Outono anterior ao crescimento • Significância a 95%

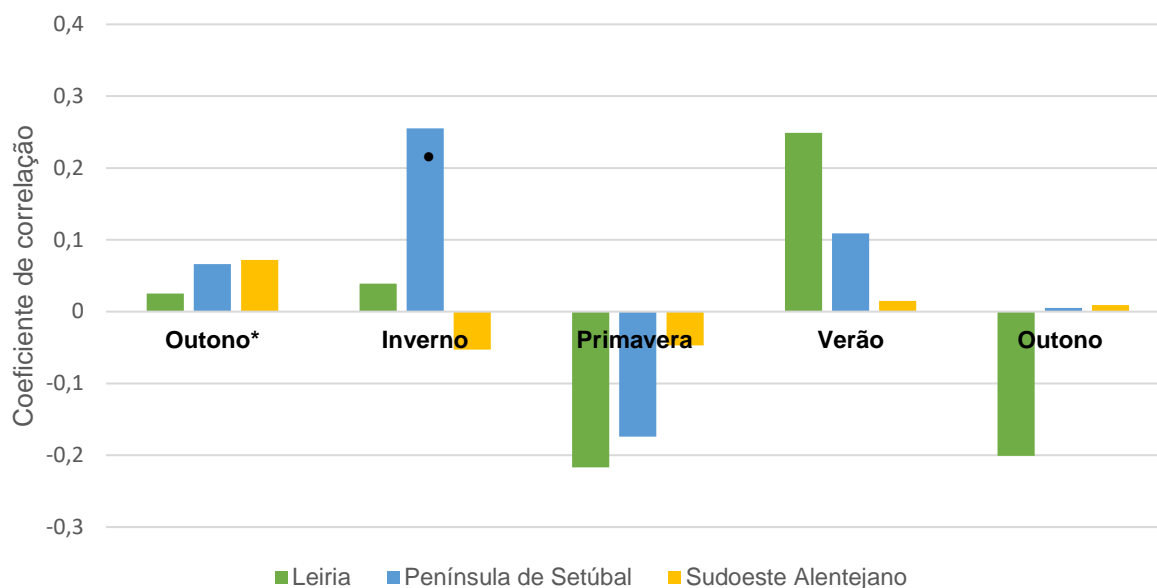


Figura 5.32. Correlação entre o crescimento e a precipitação para o Pinheiro-Bravo. * Outono anterior ao crescimento • Significância a 95%

Em condições ambientalmente propícias as plantas priorizam a utilização dos glúcidos no crescimento, sendo que alocam os restantes nos seus mecanismos de defesa (Herms e Mattson, 1992; Lombardero *et al.*, 2000). Sendo o Pinheiro-Manso uma espécie de crescimento lento e como visto anteriormente, possui alturas específicas para o seu crescimento, possui um maior número de defesas do que o Pinheiro-Bravo (Pimentel *et al.*, 2017).

No Sudoeste Alentejano o Pinheiro-Bravo tem uma menor capacidade de produzir glúcidos, quer pela redução da taxa fotossintética pelo fecho dos estomas, quer pelo stress hídrico, o que pode explicar a sua elevada sensibilidade às condições climáticas na região (tabela 5.6). E tendo em conta que os poucos glúcidos que possui são alocados preferencialmente para o crescimento, as suas defesas encontram-se assim fragilizadas. Nisto resulta, como já referido, a sua elevada suscetibilidade às pragas, o que não se verifica no Pinheiro-Manso (Pimentel *et al.*, 2017).

5.4. Variação da alteração da espessura do anel

Observa-se na figura 5.33 que o Pinheiro-Bravo apresenta as maiores reduções na espessura do anel em anos de seca, conseguindo recuperar nos anos seguintes. Constata-se também uma resposta diferente nas três regiões estudadas, tal como refere Pasho *et al.* (2011). Em Leiria (figura 5.33A) e na Península de Setúbal (figura 5.33B), a maior parte das reduções traduzem-se em anéis com uma espessura 10% inferior à espessura do anel formado no ano anterior. Já no Sudoeste Alentejano as reduções são mais acentuadas. Por outro lado, verifica-se uma maior recuperação das árvores na região mais a sul.

De uma forma geral verifica-se que em situações mais extremas o Pinheiro-Bravo forma anéis mais finos, chegando a uma redução de quase 60%, e que a sul, onde as condições são mais severas, as

árvores são menos resistentes, mas têm uma maior recuperação. Tal situação também é referenciada por Gazol *et al.* (2017).

Tal como o Pinheiro-Bravo, o Pinheiro-Manso (figura 5.34), apresenta as maiores reduções na espessura do anel formado em anos considerados secos, havendo reduções próximas de 60% em eventos mais extremos. Após estes eventos, assim que existir disponibilidade hídrica, esta espécie recupera. E tal como o Pinheiro-Bravo, também o Pinheiro-Manso apresenta maiores recuperações a sul.

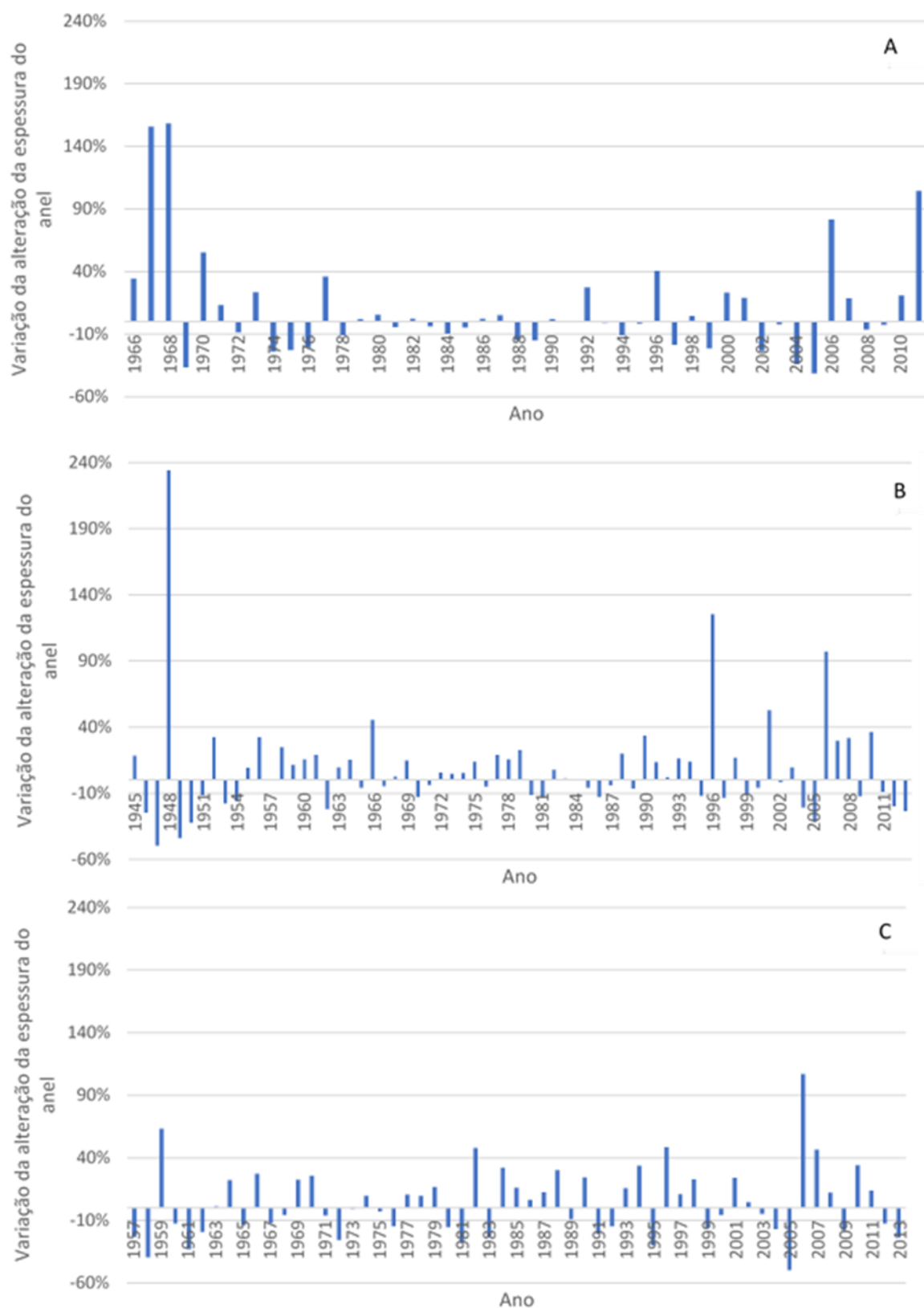


Figura 5.33. Variação da alteração da espessura do anel para as árvores de Pinheiro-Bravo. A – Leiria, B – Península de Setúbal, C - Sudoeste Alentejano

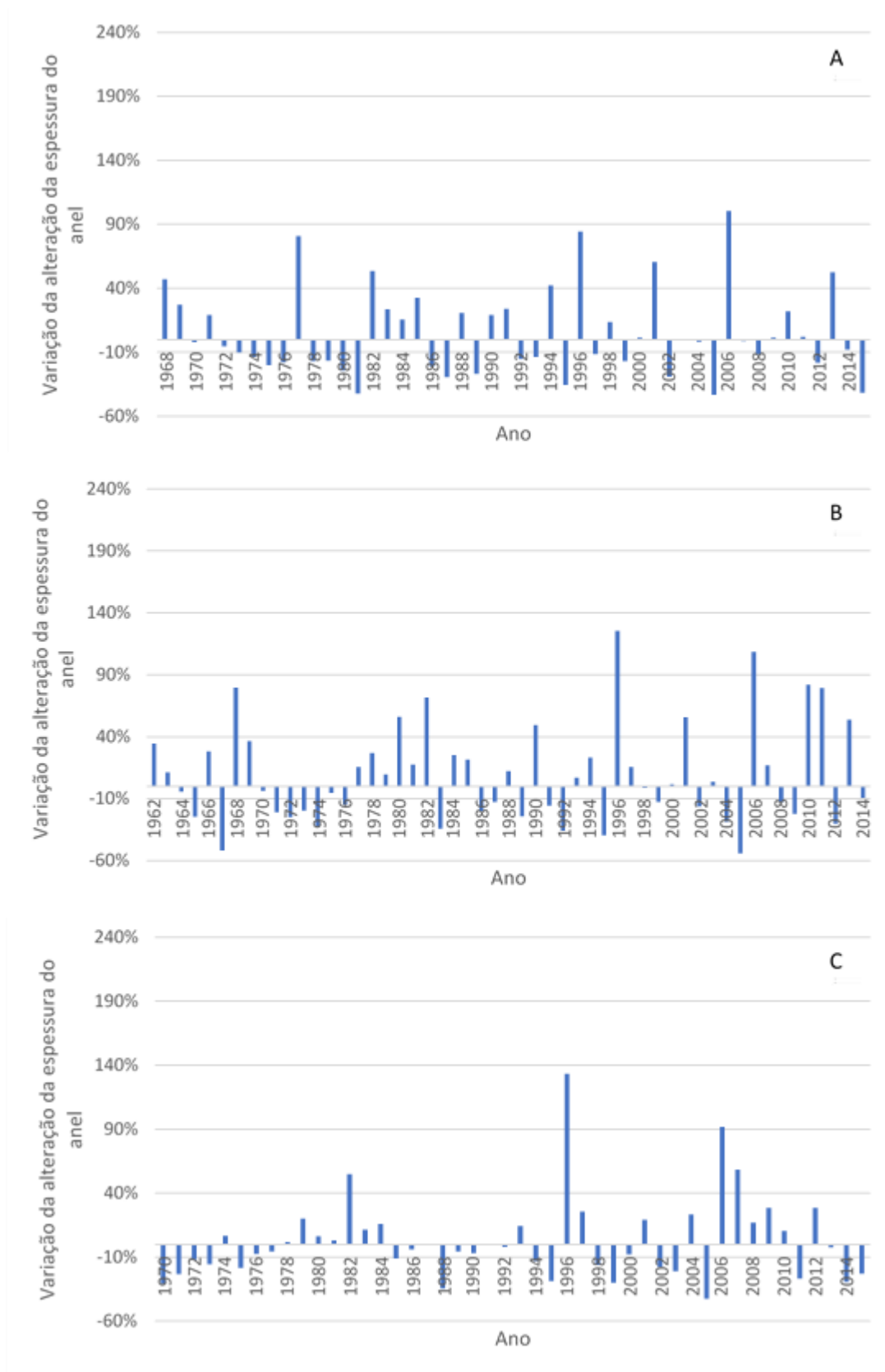


Figura 5.34. Variação da alteração da espessura do anel para as árvores de Pinheiro-Manso. A – Leiria, B – Península de Setúbal, C - Sudoeste Alentejano

Comparando a resposta aos eventos extremos destas espécies, verifica-se que, embora próximas, possuem respostas diferentes, o que também é referido por Warren *et al.* (2012), ao estudar a resposta de duas espécies de eucaliptos à falta de água. A norte do rio Tejo o Pinheiro-Bravo é a espécie que recupera melhor. Por outro lado, a sul do rio Tejo é o Pinheiro-Manso que obtém uma melhor recuperação. Tal situação foi observada por Navarro-Cerrillo *et al.* (2018), referindo que as árvores com um menor crescimento radial possuem uma menor capacidade em lidar com os efeitos das secas.

5.5. Modelo de influência climática no desenvolvimento dos anéis anuais de crescimento

A figura 5.35 e a figura 5.36 refletem a variação da temperatura e da precipitação, respetivamente, consoante dois cenários distintos de emissões de gases de efeito de estufa, RCP4.5 e RCP8.5. Verifica-se para ambos os cenários um aumento da temperatura e uma diminuição da precipitação nas três regiões em estudo. O cenário RCP8.5 é o que apresenta um maior aumento da temperatura, especialmente nas regiões a sul do Tejo, e também uma diminuição da precipitação.

Esta informação vai ao encontro com o referido na presente dissertação, em que se espera um agravamento das condições climáticas, temperaturas mais elevadas e menos precipitação, para o país em geral, sendo as regiões a sul do Tejo as mais afetadas.

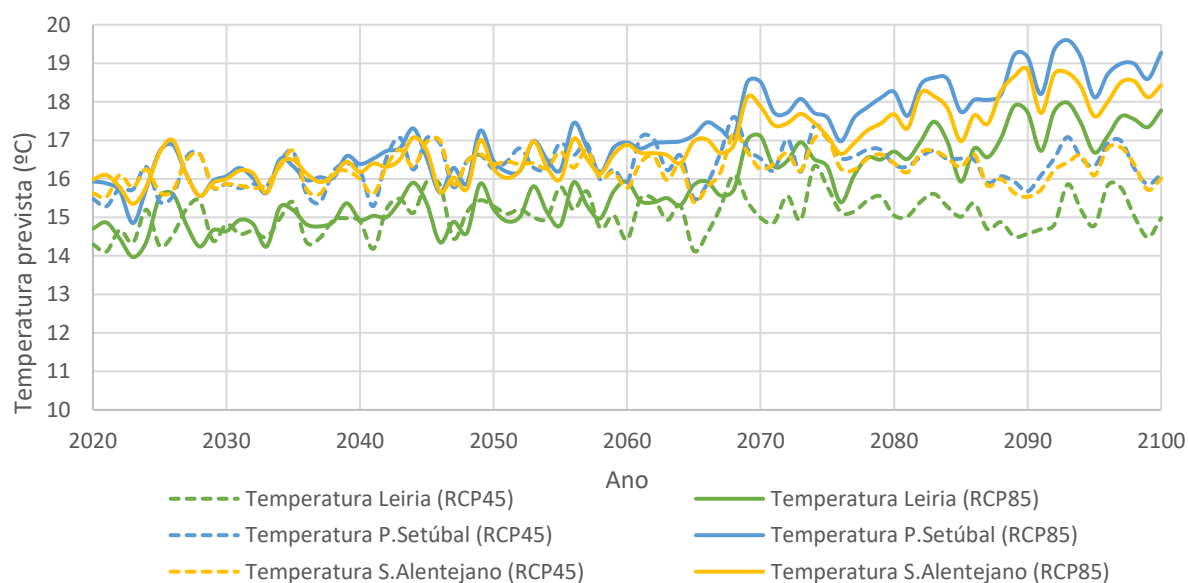


Figura 5.35. Variação prevista da temperatura entre 2020 e 2100 para as três regiões em estudo consoante os cenários RCP4.5 e RCP8.5

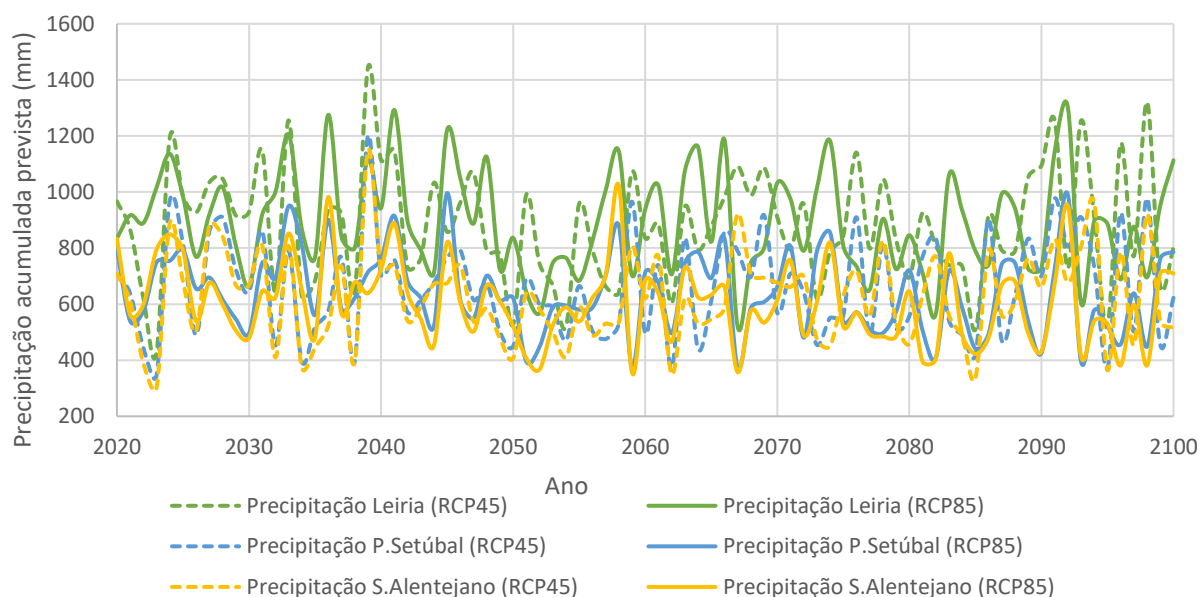


Figura 5.36. Variação prevista da precipitação entre 2020 e 2100 para as três regiões em estudo consoante os cenários RCP4.5 e RCP8.5

Com a aplicação do modelo VS-Lite foram obtidos os limiares para qual a temperatura (T_1) e a humidade presente no solo (M_1) permitem o crescimento e os valores mínimos de temperatura (T_2) e humidade no solo (M_2), para quais o crescimento é ótimo. Os valores encontram-se presentes na tabela 5.7 e encontram-se dentro dos limites definidos (Breitenmoser *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2017)

Tabela 5.7. Limiares de temperatura e humidade no solo para o Pinheiro-Bravo e Pinheiro-Manso em cada região em estudo. T_1 – temperatura mínima para haver crescimento ($^{\circ}\text{C}$); T_2 – Temperatura mínima para o crescimento ótimo ($^{\circ}\text{C}$); M_1 – humidade mínima no solo para haver crescimento (v/v); M_2 – humidade mínima no solo para o crescimento ótimo (v/v)

		T_1	T_2	M_1	M_2
Leiria	Pinheiro-Bravo	5,3	19,4	0,0096925	0,10319
	Pinheiro-Manso	6,3	19,2	0,087603	0,17188
Península de Setúbal	Pinheiro-Bravo	5,4	22,1	0,013260	0,10759
	Pinheiro-Manso	7,6	20,3	0,018420	0,32364
Sudoeste Alentejano	Pinheiro-Bravo	5,8	16,8	0,024884	0,10816
	Pinheiro-Manso	6,9	15,6	0,0079331	0,10266

Já foi referido que o Pinheiro-Bravo é uma espécie que se distribui preferencialmente a norte do Tejo. Observa-se na tabela anterior que é na região a norte do Tejo que o Pinheiro-Bravo tem a temperatura mais baixa para dar início ao crescimento, bem como um valor mais baixo de disponibilidade hídrica no solo para que possa haver crescimento, o que se traduz na melhor adequabilidade desta zona para o Pinheiro-Bravo.

No caso do Pinheiro-Manso verifica-se que é na região mais a sul que se encontram as melhores condições para o seu desenvolvimento. A temperatura na região é mais elevada e a espécie apresenta o valor mais baixo para a temperatura mínima para o crescimento ótimo. O limiar de humidade no solo é baixo, permitindo o seu desenvolvimento em situações com pouca disponibilidade hídrica. É de destacar que é nesta região que o Pinheiro-Bravo requer mais água (M_1 mais elevado) para que se possa desenvolver.

A Península de Setúbal constitui uma zona intermédia onde existem melhores condições para a coexistência das duas espécies. O limiar de humidade no solo para que possa haver crescimento das duas espécies é próximo, o que não se verifica nas outras regiões. A nível do parâmetro temperatura é nesta região que ocorre uma temperatura mais elevada para o crescimento ótimo para as duas espécies, que é atingida no verão. Contudo, nesta época a disponibilidade hídrica é menor. O Pinheiro-Manso poderá ser favorecido por esta situação pois a temperatura mínima para o seu crescimento ótimo é inferior à temperatura do Pinheiro-Bravo.

Para o cenário RCP4.5 verifica-se uma resposta semelhantes das duas espécies ao clima (figura 5.37). As espécies atingem mínimos em períodos semelhantes. Estes mínimos parecem corresponder a períodos de seca, como por exemplo os períodos entre 2060 e 2070 e por volta de 2090. Até 2040 espera-se um período de baixo crescimento

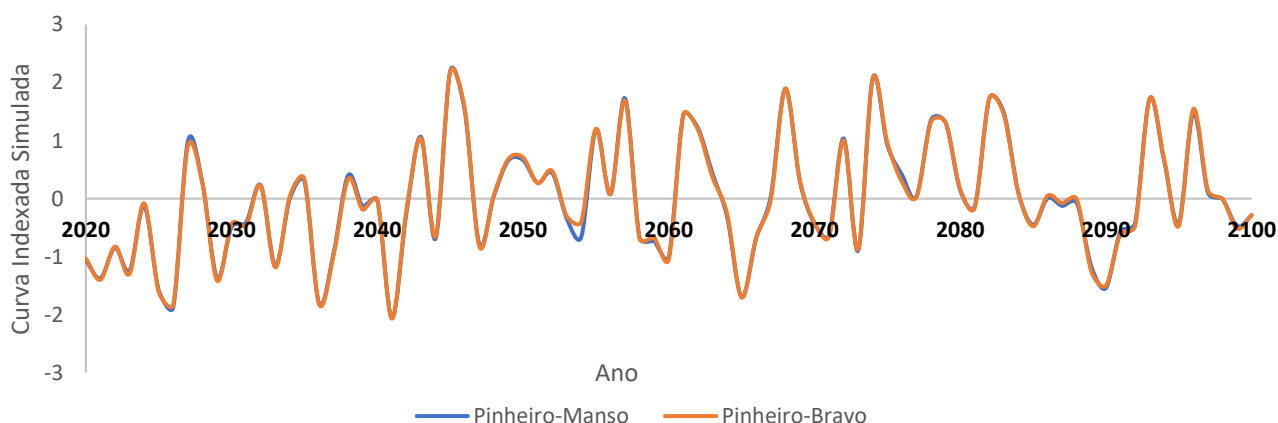


Figura 5.37. Curva Indexada para as duas espécies na região de Leiria tendo por base o cenário RCP4.5

Para as duas espécies o crescimento na região será limitado essencialmente pela temperatura (figura 5.38 e figura 5.39). O crescimento do Pinheiro-Bravo é ligeiramente favorecido pois apresenta um T_1 e M_1 inferior. Em períodos de seca a disponibilidade hídrica poderá torna-se limitante essencialmente durante o verão e início de outono.

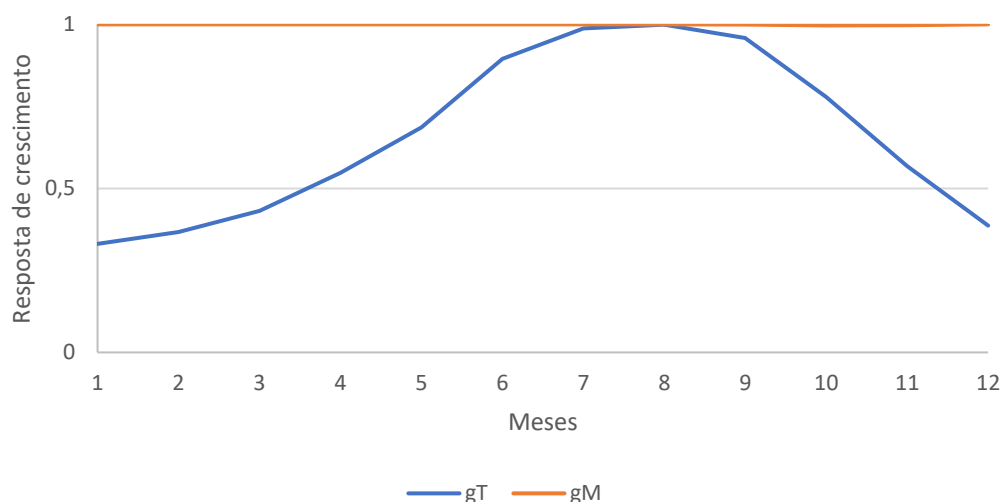


Figura 5.38. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso em Leiria, tendo por base o cenário RCP4.5

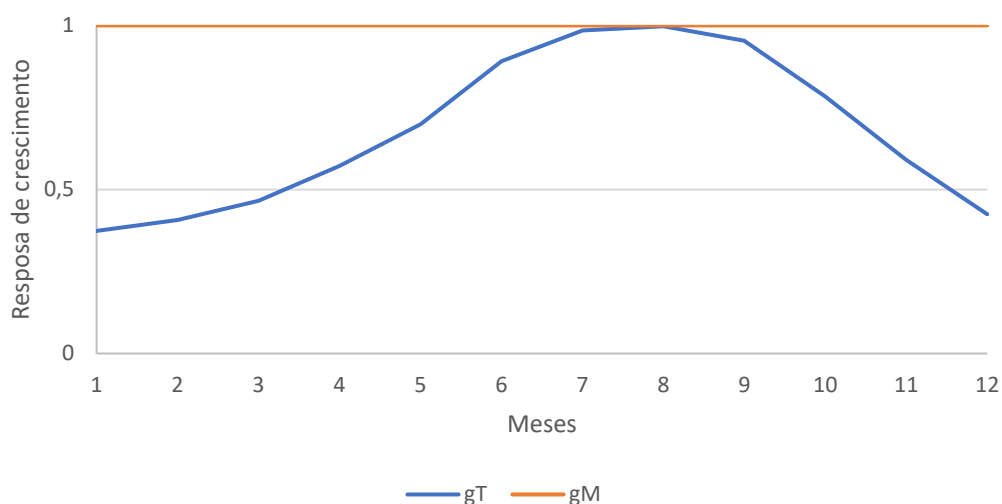


Figura 5.39. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo em Leiria, tendo por base o cenário RCP4.5

No pior cenário (figura 5.40) verifica-se um alargamento do período de baixo crescimento até 2060. Continua a verificar-se um mínimo antes de 2070, mas em vez de um mínimo de crescimento em 2090, identifica-se um após 2080. Os mínimos acentuados verificados para o Pinheiro-Manso são o resultado de possuir um M_2 superior ao Pinheiro-Bravo. Neste cenário o aumento da temperatura associado à diminuição da precipitação já se traduz numa limitação do crescimento devido à disponibilidade hídrica no verão/início de outono, especialmente para o Pinheiro-Bravo (figura 5.41 e figura 5.42). Nas restantes épocas a temperatura atua como fator limitante.

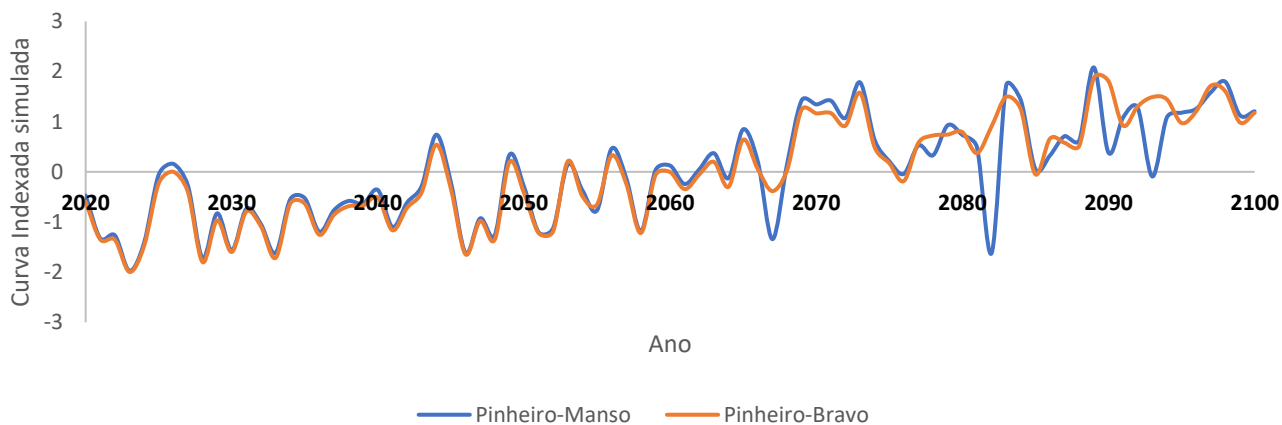


Figura 5.40. Curva Indexada para as duas espécies na região de Leiria tendo por base o cenário RCP8.5

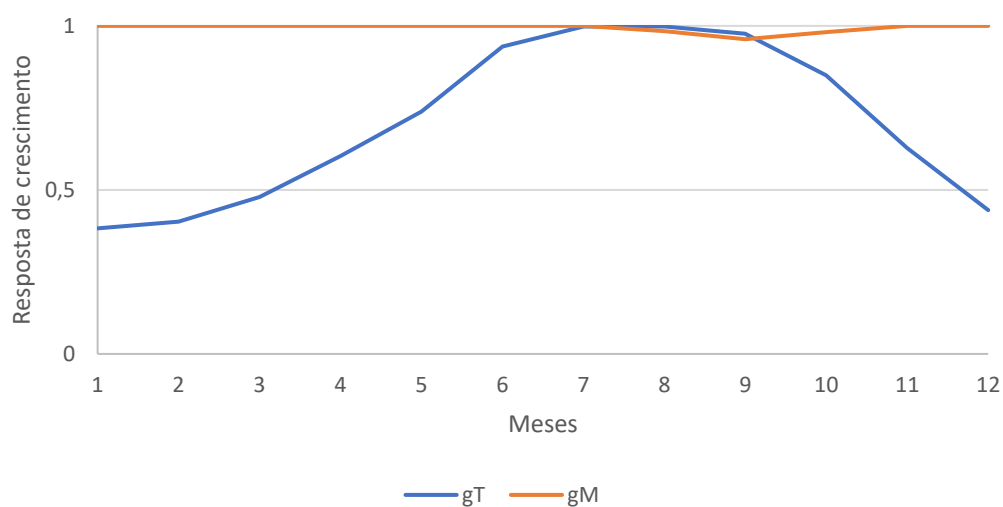


Figura 5.41. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso em Leiria, tendo por base o cenário RCP8.5

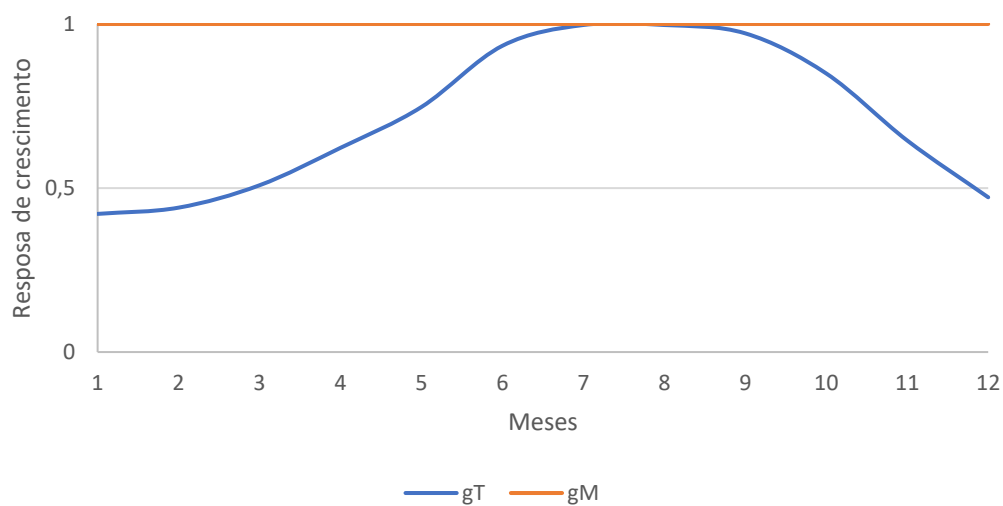


Figura 5.42. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo em Leiria, tendo por base o cenário RCP8.5

Na região da Península de Setúbal as duas espécies apresentam uma resposta ligeiramente diferente ao clima. Tal como na região de Leiria para o cenário RCP4.5, as espécies também aparentam ter um período de crescimento reduzido até 2040 (figura 5.43). Identifica-se, também, especialmente para o Pinheiro-Manso, um mínimo entre 2080 e 2090.

Esta resposta diferenciada deve-se aos valores dos limiares presentes na tabela 5.7, uma vez que o Pinheiro-Manso apresenta um M_2 elevado sendo limitado pela disponibilidade hídrica durante o verão/outono (figura 5.44) e o Pinheiro-Bravo um T_2 elevado, sendo limitado ao longo do ano pela temperatura (figura 5.45). Em altura com menor disponibilidade hídrica, o crescimento do Pinheiro-Manso será limitado. Por sua vez, o Pinheiro-Bravo será limitado por possuir um mínimo para a temperatura ótima elevado.

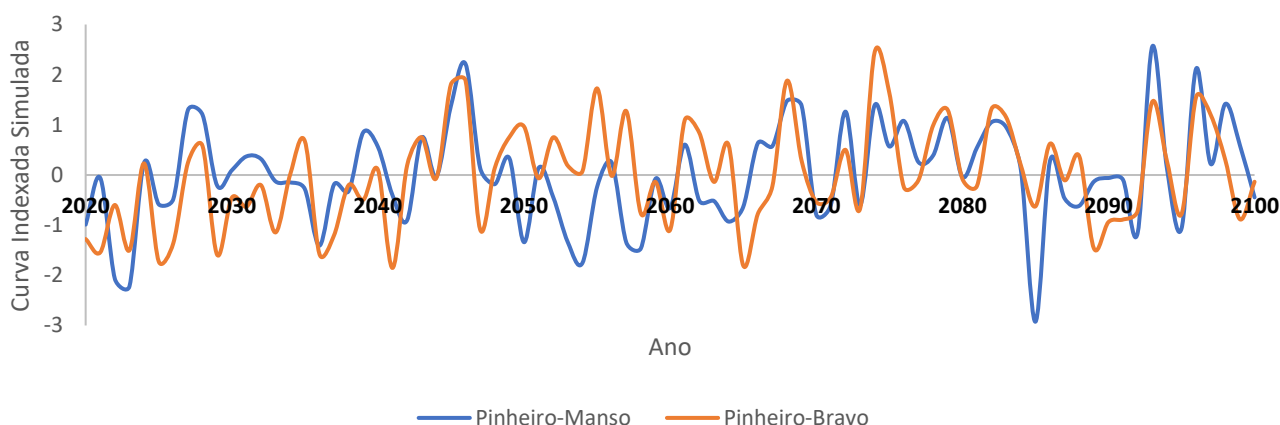


Figura 5.43. Curva Indexada para as duas espécies na região da Península de Setúbal tendo por base o cenário RCP4.5

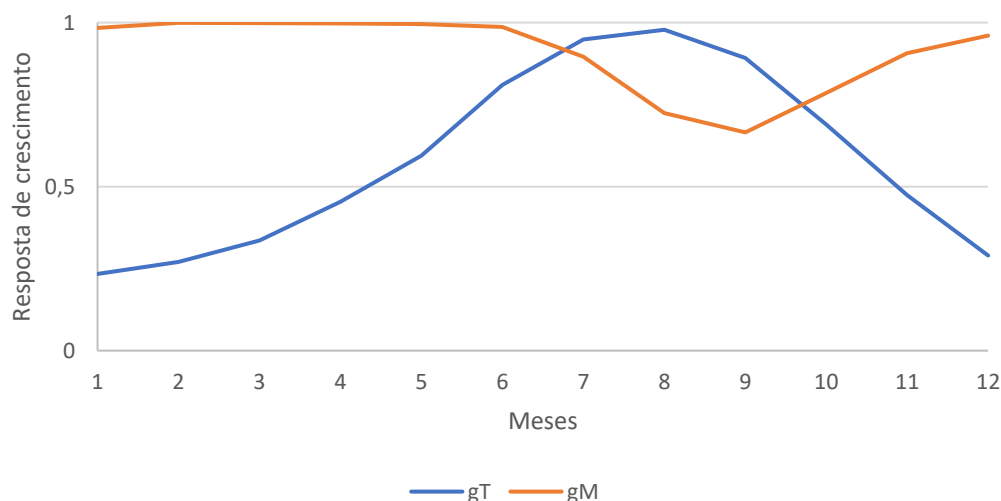


Figura 5.44. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP4.5

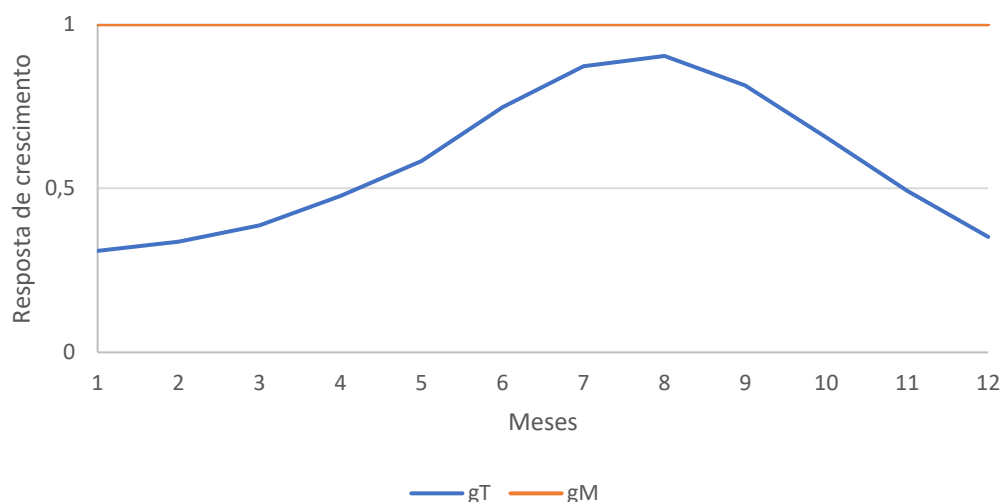


Figura 5.45. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP4.5

Com o aumento contínuo de emissões, cenário RCP8.5, verifica-se mais uma vez o prolongamento até 2060 de um período de crescimento reduzido (Figura 5.46). Verificam-se ainda mínimos de crescimento entre 2060 e 2070, e após 2080. Observa-se também que o Pinheiro-Manso apresenta uma maior sensibilidade, especialmente após 2060. Tal situação deriva da limitação ao seu crescimento devido à disponibilidade hídrica (Figura 5.47) que é agravada nesta região a sul do Tejo que se espera ter uma redução na precipitação. O Pinheiro-Bravo apresenta limitação através da temperatura, e poderá desenvolver-se assim que as condições se tornem favoráveis (Figura 5.48).

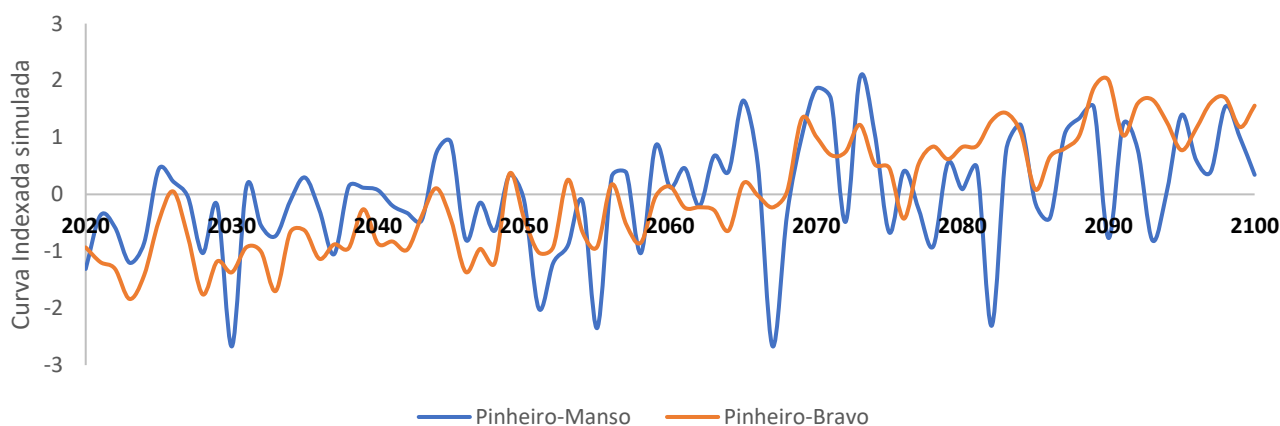


Figura 5.46. Curva Indexada para as duas espécies na região da Península de Setúbal tendo por base o cenário RCP8.5

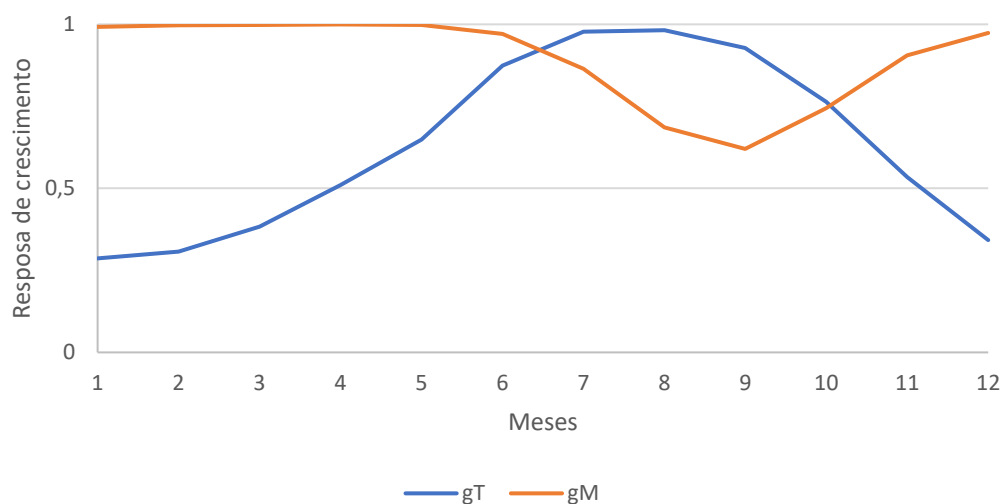


Figura 5.47. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Mansão na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP8.5

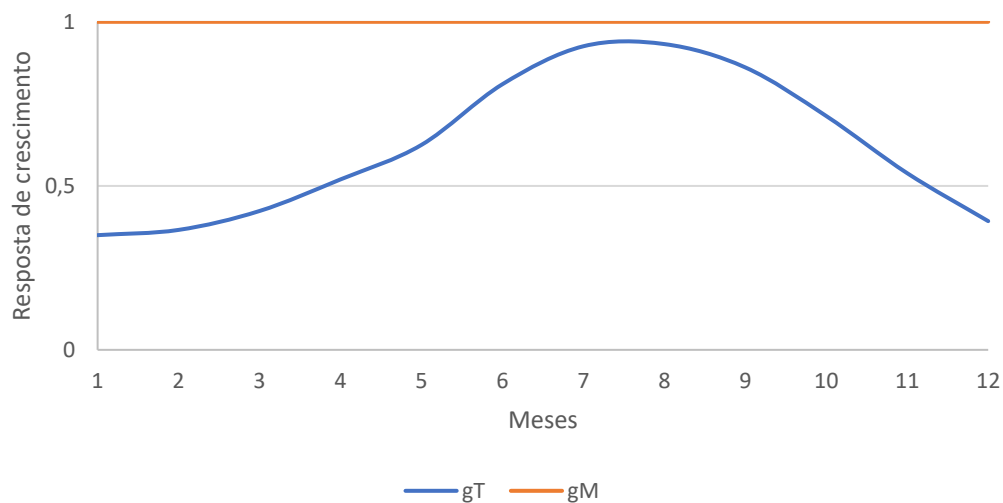


Figura 5.48. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo na Península de Setúbal, tendo por base o cenário RCP8.5

Para a região do Sudoeste Alentejano, com base no cenário RCP4.5, verifica-se uma resposta semelhantes das duas espécies ao clima (figura 5.49), sendo que estas atingem mínimos de crescimento nos mesmos períodos. Verifica-se, mais uma vez, um período de baixo crescimento até 2040. A região poderá, por volta de 2090, vir a ser afetada por um período de seca.

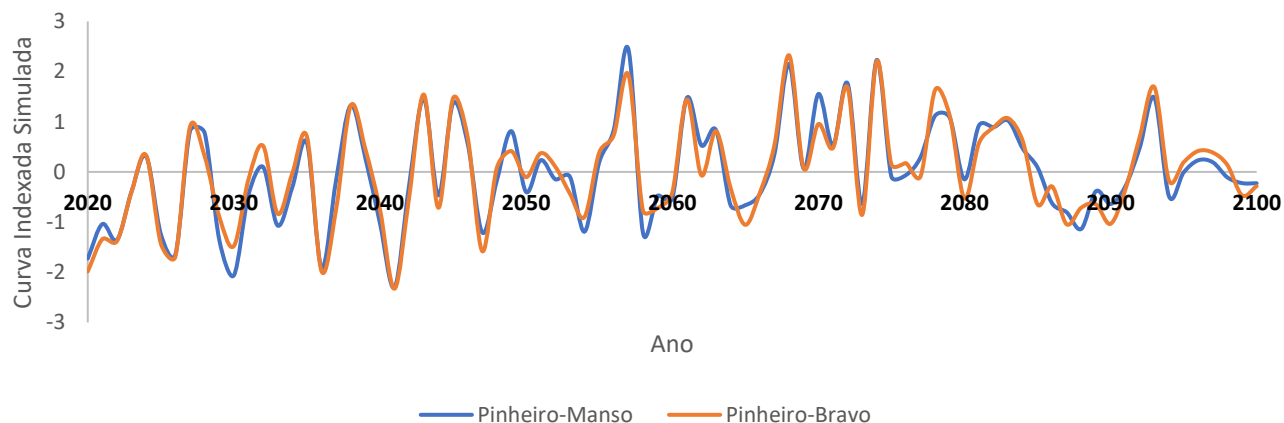


Figura 5.49. Curva Indexada para as duas espécies na região do Sudoeste Alentejano tendo por base o cenário RCP4.5

Devido às temperaturas elevadas na região, o Pinheiro-Manso atinge cedo valores ótimos para o crescimento, ficando dependente da disponibilidade hídrica (figura 5.50). O mesmo acontece, embora com valores ligeiramente inferiores, para o Pinheiro-Manso (figura 5.51). Nesta região poderá ocorrer um prolongamento da estação de crescimento.

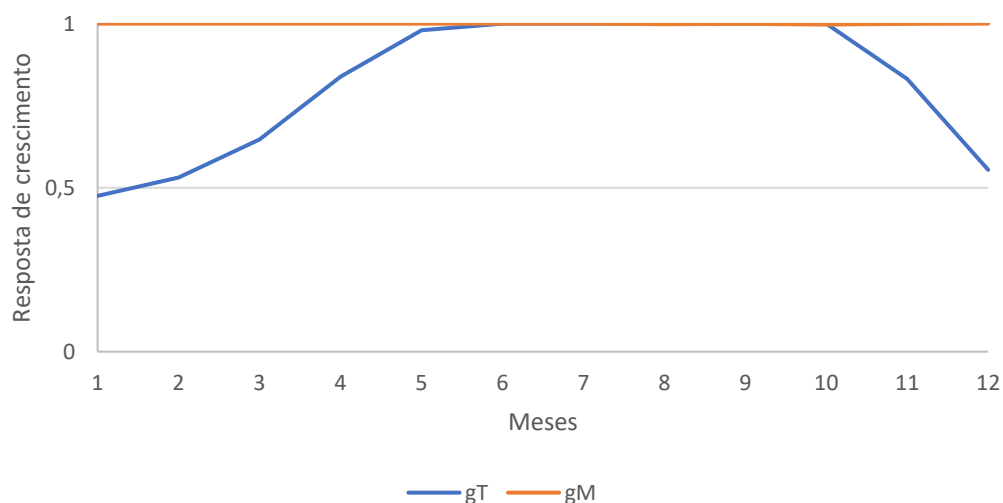


Figura 5.50. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP4.5

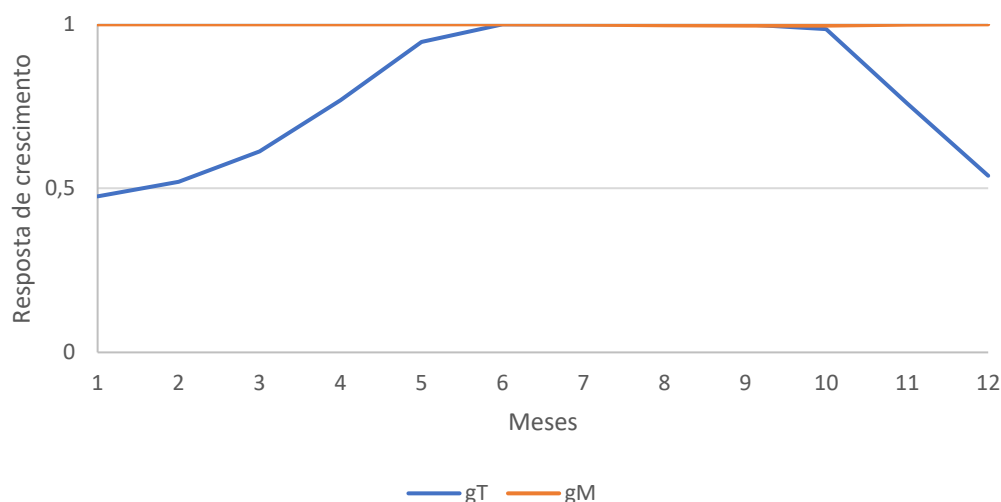


Figura 5.51. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP4.5

No pior cenário de emissão de gases de efeito de estufa, RCP8.5, as duas espécies apresentam nesta região uma sensibilidade ao clima previsto (figura 5.52). Até 2060 o crescimento é baixo, bem como no período antes de 2070 e por volta de 2080 até 2090, o que pode indicar um possível período de seca.

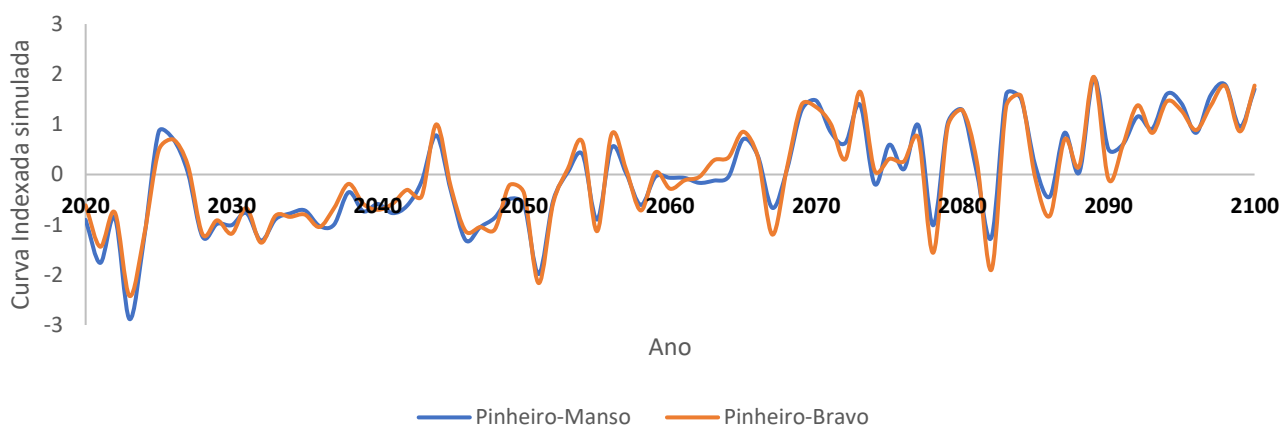


Figura 5.52. Curva Indexada para as duas espécies na região do Sudoeste Alentejano tendo por base o cenário RCP8.5

Devido ao aumento da temperatura e à diminuição da precipitação, entre a primavera e o outono as espécies em estudo estarão dependentes da quantidade de precipitação e, consequentemente, da disponibilidade hídrica (figura 5.53 e figura 5.54). Entre elas, o Pinheiro-Bravo é a espécie que apresenta maior dependência da água existente no solo.

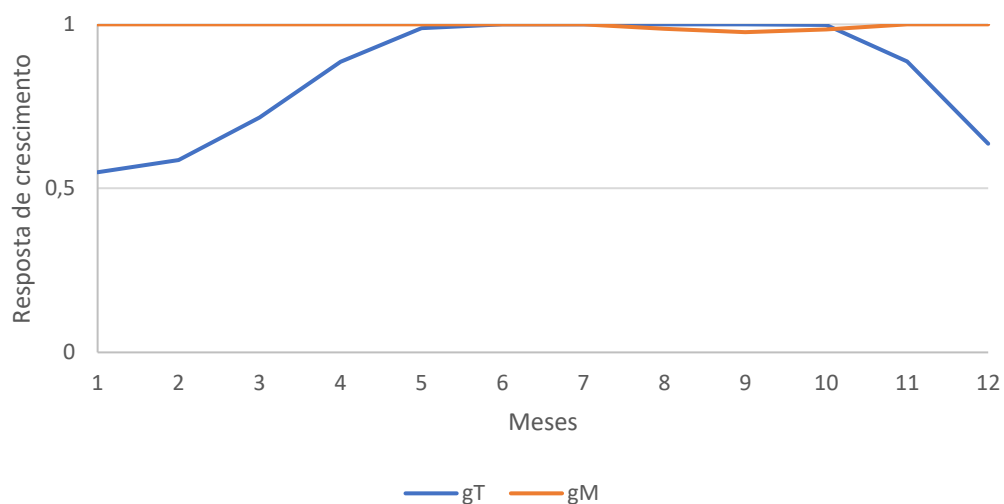


Figura 5.53. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP8.5

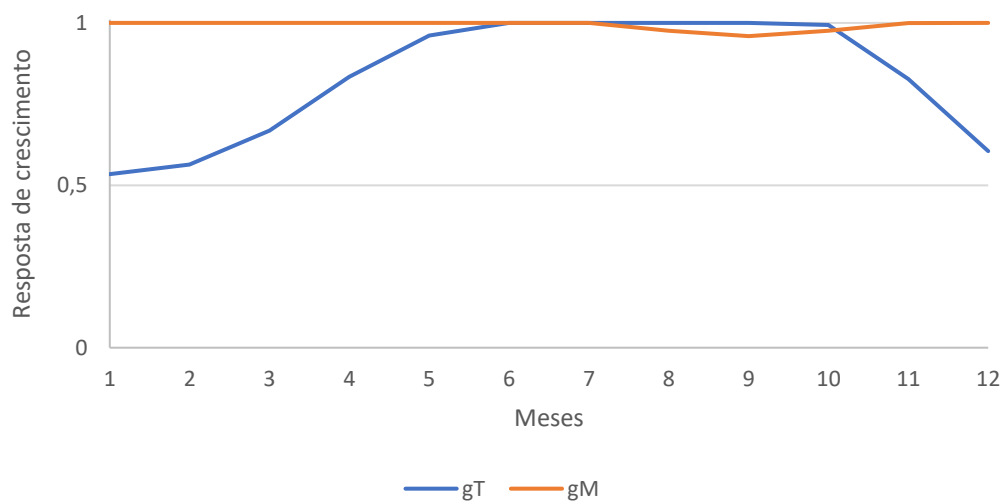


Figura 5.54. Curvas da resposta de crescimento devido à temperatura (gT) e à disponibilidade hídrica (gM) para o Pinheiro-Bravo no Sudoeste Alentejano, tendo por base o cenário RCP8.5

6) Considerações finais

6.1. Conclusão

O principal objetivo da presente dissertação consiste no estudo da influência do clima no crescimento de duas espécies nativas de Portugal, o Pinheiro-Bravo e o Pinheiro-Manso. O Pinheiro-Bravo tem uma distribuição preferencial a norte do Tejo enquanto que o Pinheiro-Manso tem uma distribuição preferencial a sul do Tejo.

Devido aos gradientes de vários parâmetros climáticos, nomeadamente temperatura e precipitação, Portugal continental é caracterizado por possuir duas grandes zonas climáticas diferentes. Uma zona a norte do Tejo, mais húmida e fria, e uma zona a sul do Tejo, mais seca e quente. Devido às alterações climáticas espera-se a ocorrência de menor disponibilidade hídrica especialmente a sul do Tejo.

Para estudar o efeito do clima, ao longo do gradiente climático, foram amostradas três regiões: Leiria, Península de Setúbal e Sudoeste Alentejano. Nestas regiões ambas as espécies foram amostradas e analisados os seus anéis de crescimento. Assim, foi feito um estudo dendroclimatológico, tendo-se correlacionado o clima com os anéis de crescimento.

Verificou-se que o Pinheiro-Manso é uma espécie com crescimento mais lento, encontrando-se bem-adaptada a ambientes mais xéricos. O Pinheiro-Bravo é uma espécie com crescimento mais rápido, distribui-se preferencialmente em locais mais húmidos. Esta espécie possui mecanismos próprios para minimizar os efeitos prejudiciais das secas.

Nas regiões a sul do Tejo ocorre uma antecipação da estação de crescimento do Pinheiro-Manso, especialmente no Sudoeste Alentejano, ao correlacionar-se com a temperatura de outono do ano anterior ao crescimento. A nível da precipitação verifica-se uma importância da precipitação de outono do ano anterior ao crescimento e da de inverno. Em Leiria, o desenvolvimento é inferior, pois a temperatura é inferior, sendo importante a precipitação da primavera, pois é a estação quando ocorre o crescimento.

Para o Pinheiro-Bravo verifica-se um crescimento contínuo em Leiria, sendo mais reduzido no inverno. Na Península de Setúbal o crescimento ocorre essencialmente na primavera, verão e outono. Nestas regiões é importante a precipitação de outono, inverno e verão. Na região mais sul, a temperatura mais elevada não permite o crescimento, ocorrendo ligeiramente na primavera com os recursos disponíveis.

Em Leiria, com as mudanças previstas, o Pinheiro-Manso poderá beneficiar do aumento da temperatura, contudo sairá mais prejudicado nas secas, pois o valor mínimo para qual a humidade no solo é ótima é superior ao Pinheiro-Bravo, e as correlações existentes com a temperatura atualmente são baixas, e dado que se espera uma diminuição da precipitação na primavera, poderá vir a ser importante para esta espécie a precipitação de outono. O Pinheiro-Bravo poderá vir a beneficiar do aumento da precipitação de outono, uma vez que as correlações com a temperatura são significativas.

O aumento da precipitação de outono poderá vir também a beneficiar o Pinheiro-Manso no Sudoeste Alentejano, uma vez que esta é importante para recarregar os solos antes do início da estação de crescimento. Nesta região a estação de crescimento poderá também ser alargada. No verão poderá haver problemas de disponibilidade hídrica. A diminuição da precipitação na primavera poderá ser prejudicial para o Pinheiro-Bravo nesta região, uma vez que poderá vir a contribuir para um aumento do período de seca que afetará negativamente esta espécie.

Na Península de Setúbal o Pinheiro-Manso será afetado pela falta de água no solo, especialmente no verão e com a diminuição da precipitação na primavera. Em períodos de seca, a espécie poderá vir a ter mínimos de crescimentos, inferiores ao Pinheiro-Bravo. Já o Pinheiro-Bravo poderá vir a beneficiar da precipitação de outono para suavizar o aumento da temperatura na região.

Dado o seu crescimento rápido, o Pinheiro-Bravo armazena poucos metabolitos, alocando uma pequena quantidade para os seus mecanismos de defesa. Verificou-se quem em regiões mais limitantes onde o seu crescimento é reduzido e mais dependente das variáveis ambientais, e onde a taxa fotossintética é menor, e consequente, possui menos metabolitos armazenados, a espécie é mais sensível ao clima e às pragas. Durante eventos extremos caracterizados por um aumento da temperatura e pouca disponibilidade hídrica, as árvores produzem anéis mais estreitos. Porém, a partir do momento em que haja disponibilidade hídrica, a árvore recupera, formando anéis mais largos. Embora a norte do Tejo o Pinheiro-Bravo possua uma maior capacidade de recuperação em comparação com o Pinheiro-Manso, ambas recuperam melhor a sul do Tejo, sendo o Pinheiro-Manso a espécie que melhor recupera. O Pinheiro-Manso é assim uma espécie mais resiliente à seca em comparação com o Pinheiro-Bravo.

As espécies são maioritariamente limitadas pela temperatura, contudo, nos meses de verão, verifica-se uma dependência da disponibilidade hídrica. Com o aumento da temperatura e a diminuição da precipitação espera-se um período de crescimento reduzido que pode ser prolongado nos piores cenários. Através da análise das curvas indexadas simuladas verifica-se mínimos comuns entre 2060 e 2070 e entre 2080 e 2090 o que poderá indicar que nestes dois períodos haverá um período de seca de destaque.

Caso se verifique um agravamento do clima seco a sul do Tejo, e a mudança de um clima mais húmido para um clima seco a norte do Tejo, verificar-se-á uma alteração na paisagem costeira de Portugal. Nas zonas mais secas haverá uma redução da distribuição do Pinheiro-Bravo, e nas zonas a norte do Tejo, haverá um aumento da distribuição do Pinheiro-Manso. A zona da Península de Setúbal estará dependente forma como o clima irá variar, mas poderá vir a ser uma zona onde ambas as espécies possam coexistir, com maior prevalência do Pinheiro-Manso.

O Pinheiro-Bravo poderá vir a desaparecer nas zonas costeiras a sul, enquanto que a norte colonizará áreas mais húmidas para o desenvolvimento. No entanto, dado que o presente estudo apenas contemplou regiões costeiras, não é possível uma conclusão em relação à distribuição longitudinal da espécie. A diminuição da distribuição do Pinheiro-Bravo associada à diminuição da produtividade das espécies (Pereira *et al.*, 2006) poderá ser espectável uma diminuição dos ganhos.

De modo a ser possível uma preservação das duas espécies, é vital recorrer a uma gestão do espaço florestal tendo em contas os resultados obtidos na presente dissertação. Uma vez que o Pinheiro-Bravo se tornará uma espécie ameaçada pelos efeitos nefastos das alterações climáticas, é essencial que nas áreas destinadas à sua produção não sejam contempladas espécies que possuam um grande consumo de água. Também será importante evitar que as árvores se desenvolvam próximas entre elas, de forma a evitar a competição intraespecífica.

As espécies apresentam limiares diferentes consoante a sua localização. Tal situação indica uma adaptação ao local, resultado das suas estratégias adaptativa. Verifica-se uma dependência dos fatores limitantes resultado da interação Temperatura-Precipitação, sendo por isso importante a determinação destes valores a nível regional, e verificar assim, a adaptabilidade das espécies aos locais com base nos cenários de alterações climática. Um mapa de adaptabilidade resultado da junção de mapas adaptabilidade regional seria mais adequado do que um mapa de adaptabilidade utilizando valores médios.

O estudo dendroclimatológico verificou-se assim uma metodologia viável para estudar o impacto que as variáveis ambientais têm nas espécies referidas. Esta técnica tem assim a vantagem de entrar em consideração com variáveis que foram afetadas pelo clima presente, os padrões de crescimento, e não apenas, variáveis teóricas, como temperatura, valores de precipitação e tipo de solo preferencial.

Na mais recente Estratégia Nacional para as Florestas é indicado que se pretende um aumento das áreas ocupadas por Pinheiro-Bravo e Pinheiro-Mansão até 2030, entre 2 a 10%, e entre 15 a 33%, respetivamente. No entanto, apenas foi tido em conta, a área existente atualmente, uma possível percentagem de área ardida, a regeneração das espécies após incêndios e os valores da taxa de deflorestação. Contudo, como é apresentado na presente dissertação, também seria necessário entrar no cálculo a alteração das áreas preferenciais das espécies, pois esta poderá mudar devido às consequências das alterações climáticas.

Em suma, conclui-se que a resposta ao clima é específica da espécie e está dependente do local, sendo que o crescimento do Pinheiro-Bravo é influenciado pelo clima, possuindo mecanismos que evitam os efeitos negativos das secas, e o crescimento do Pinheiro-Mansão é adaptado ao clima. Com as alterações, verificar-se-á uma alteração da paisagem costeira portuguesa. O Pinheiro-Bravo continuará a ter uma redução na área por si ocupada, especialmente a sul, levando consequentemente a uma redução dos ganhos económicos. Por outro lado, o Pinheiro-Mansão terá um aumento da sua distribuição, contudo, as temperaturas mais altas limitam a sua capacidade fotossintética, reduzindo a sua produtividade, e consequentemente haverá uma diminuição das receitas na exploração de Pinheiro-Mansão.

Torna-se por isso necessária uma intervenção na gestão florestal das florestas portuguesas, no sentido de criar medidas que tenham em consideração a evolução da floresta tendo em conta os cenários das alterações climáticas. Caso contrário, Portugal poderá sofrer perdas, quer a nível da biodiversidade, quer a nível económico.

6.2. Limitações ao trabalho

Ambas as espécies têm um uso limitado em dendrocronologia e dendroclimatologia, pois as árvores existentes são jovens e as que existem contêm anéis falsos ou possuem danos devido à resinagem e à presença de falsos anéis (Schweinnguber, 1993). Ao que o presente trabalho veio contribuir para o aumento dos estudos dendroclimatológicos utilizando estas espécies.

O facto de as amostras terem sido digitalizadas para posterior utilização no *software ImageJ*, levou a uma perda da qualidade das imagens e a uma maior dificuldade na diferenciação dos lenhos.

6.3. Trabalho futuro

Por forma a estudar o impacto do clima no crescimento do Pinheiro-Bravo e Pinheiro-Manso foram medidos os anéis anuais das árvores em questão. No entanto, um anel de crescimento é formado por lenho de início de estação e lenho de fim de estação. Em condições ótimas é formado o lenho de início de estação, já em alturas em que a temperatura é mais baixa é criado o lenho de fim de estação. Desta forma, os lenhos criados são alvo de condições climatológicas diferentes. Assim, um dos trabalhos futuros sugeridos pelo autor da presente dissertação reside no estudo do impacto climatológico em cada um dos lenhos, para assim averiguar qual a estação que tem maior impacto do crescimento das árvores.

Também foi referenciado que o Pinheiro-Bravo poderá vir a ter uma distribuição preferencial mais para o interior do país. Contudo, não foi estudado o impacto do clima atual em árvores situadas em regiões mais interiores. Deste modo, o autor também sugere a realização de um estudo dendroclimatológico ao longo do gradiente longitudinal verificado.

Dado que é importante perceber de que forma as alterações climáticas influenciam o desenvolvimento das florestas portuguesas, o autor também sugere a elaboração de um modelo semelhante ao VS-Lite aplicado ao contexto português, para posteriormente ser possível a realização de um mapa mais realista de adaptabilidade resultado da junção de mapas de adaptabilidade regional.

7) Referências Bibliográficas

Acevedo, W., Cubasch, U., Reich, S., Mathes, K. (2012). *Forward modelling of tree-ring width chronologies from Spanish Pyrenees using VS-Lite model*. Conference: TRACE - Tree Rings in

- Archaeology, Climatology and Ecology. Maio 2012 Potsdam, Alemanha, Volume: 11. doi: 10.2312/GFZ.b103-13058
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2018). *Riscos Ambientais - Seca*. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/seca>. [Acedido a 10 de Setembro de 2018]
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allard, G., Running, S., Semerci, A., Cobb, N. (2010). *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*. Forest Ecology and Management, 259(4), pp. 660–684. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
- Alves, J. (1968). Armações e desbastes. Pós-Graduação. Instituto Superior de Agronomia.
- Awada, T., Radoglou, K., Fotelli, M. N., Constantinidou, H. I. A. (2003). *Ecophysiology of seedlings of three Mediterranean pine species in contrasting light regimes*. Tree Physiology, 23, pp. 33–41. doi: 10.1093/treephys/23.1.33
- Benali, A., Carvalho, A. C., Nunes, J. P., Carvalhais, N., Santos, A. (2012). *Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data*. Remote Sensing of Environment, 124, pp. 108–121. doi: 10.1016/j.rse.2012.04.024
- Breitenmoser, P., Brönnimann, S., Frank, D. (2014). *Forward modelling of tree-ring width and comparison with a global network of tree-ring chronologies*. Climate of the Past, 10, 437–449. doi: 10.5194/cp-10-437-2014
- Brice, B., Lorion, K. K., Griffin, D., Macalady, A. K., Guiterman, C. H., Speer, J. H., Benakoun, L., Cutter, A., Hart, M. E., Murray, M. P., Nash, S. E., Shepard, R., Stewart, A. K., Wang, H. (2013). *Signal Strength In Sub-Annual Tree-Ring Chronologies from Pinus ponderosa In Northern New Mexico*. Tree-Ring Research, 69(2), pp. 81–86. doi: 10.3959/1536-1098-69.2.81
- Brito, P., Grams, T. E. E., Matyssek, R., Jimenez, M. S., Gonzalez-Rodríguez, A. M., Oberhuber, W., Wieser, G. (2016). *Increased water use efficiency does not prevent growth decline of Pinus canariensis in a semi-arid treeline ecotone in Tenerife, Canary Islands (Spain)*. Annals of Forest Science, 73(3), pp. 741–749. doi: 10.1007/s13595-016-0562-5
- Carnicer, J., Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X., Sanchez, G., Penuelas, J. (2011). *Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(4), pp. 1474–1478. doi: 10.1073/pnas.1010070108
- Carrer, M. e Urbinati, C. (2004). *Age-Dependent Tree-Ring Growth Responses to Climate in Larix decidua and Pinus cembra*. Ecology, 85(3), pp. 730–740. doi: 10.1890/02-0478
- Chen, L., Huang, J.G., Stadt, K.J., Comeau, P.G., Zhai, L., Dawson, A., Alam, S.A. (2017). *Drought explains variation in the radial growth of white spruce in western Canada*. Agricultural and Forest Meteorology, 233, pp.133-142. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.11.012

- Cook, E. R. (1987). *The Decomposition of Tree-Ring Series for Environmental Studies*. Tree-Ring Bulletin, 47, pp. 37-59.
- Cook, E. R. e Kairiukstis, L. A. (1992). *Methods of Dendrochronology: applications in the environmental science*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 403 pp.
- COS. (2015). Carta de Ocupação do Solo de Portugal continental. Direção Geral do Território.
- Costa, R., Evaristo, I., Batista, D., Afonso, S., Carrasquinho, I., Sousa, E., Inácio, L., Capelo, J., Santos, L. (2008). *Condução de Povoamentos de Pinheiro Manso e Características Nutricionais do Pinhão*. Instituto Nacional dos Recursos Biológicos, Lisboa, 50 pp.
- Costa, R., Fraga, H., Fernandes, P. M., Santos, J. A. (2017). *Implications of future bioclimatic shifts on Portuguese forests*. Regional Environmental Change, 17(1), pp. 117–127. doi: 10.1007/s10113-016-0980-9
- de Lima, M. I. P., Santo, F. E., Ramos, A. M., de Lima, J. L. M. P. (2013). *Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941-2007*. Atmospheric Research, 127, pp. 195–209. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.10.001
- de Lima, M. I. P., Santo, F. E., Ramos, A. M., Trigo, R. M. (2015). *Trends and correlations in annual extreme precipitation indices for mainland Portugal, 1941–2007*. Theoretical and Applied Climatology, 119, pp. 55–75. hdoi: 10.1007/s00704-013-1079-6
- Endara, M. J. e Coley, P. D. (2011). *The resource availability hypothesis revisited: A meta-analysis*. Functional Ecology, 25, pp. 389–398. doi: 10.1111/j.1365-2435.2010.01803.x
- Esper, J., Niederer, R., Bebi, P., Frank, D. (2008). *Climate signal age effects-Evidence from young and old trees in the Swiss Engadin*. Forest Ecology and Management, 255, pp. 3783–3789. doi: 10.1016/j.foreco.2008.03.015
- Espírito Santo, F., De Lima, M. I. P., Ramos, A. M., Trigo, R. M. (2014). *Trends in seasonal surface air temperature in mainland Portugal, since 1941*. International Journal of Climatology, 34(6), pp. 1814–1837. doi: 10.1002/joc.3803
- Espírito Santo, F., Ramos, A. M., de Lima, M. I. P., Trigo, R. M. (2013). *Seasonal changes in daily precipitation extremes in mainland Portugal from 1941 to 2007*. Regional Environmental Change, 14(5), pp. 1765–1788. doi: 10.1007/s10113-013-0515-6
- Estratégia Nacional para as Florestas de 4 de fevereiro de 2015. Diário da República nº 24/15 – 1.^a série
- Ferreira, A.G., Gonçalves, A.C., Pinheiro, A.C., Pinto-Gomes, C., Ilhéu, M., Neves, N., Ribeiro, N., Santos, P. (2001). *Plano específico de ordenamento florestal para o Alentejo*. Universidade de Évora
- Fowler, A. (1988). *Climatic reconstructions from tree rings*. Weather and Climate, 8(1), pp. 33–45.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, Londres, 571 pp.

- Gazol, A., Ribas, M., Gutiérrez, E., Camarero, J. (2017). *Aleppo pine forests from across Spain show drought-induced growth decline and partial recovery*, Agricultural and Forest Meteorology, 232, pp. 186-194. doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2016.08.014.
- Giorgi, F. e Lionello, P. (2008). *Climate change projections for the Mediterranean region*. Global and Planetary Change, 63, pp. 90–104. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005
- Granda, E., Rossatto, D. R., Camarero, J. J., Voltas, J., Valladares, F. (2013). *Growth and carbon isotopes of Mediterranean trees reveal contrasting responses to increased carbon dioxide and drought*. Oecologia, 174(1), pp. 307–317. doi: 10.1007/s00442-013-2742-4
- Greve, P., Orlowsky, B., Mueller, B., Sheffield, J., Reichstein, M., Seneviratne, S. I. (2014). *Global assessment of trends in wetting and drying over land*. Nature Geoscience, 7(10), pp. 716–721. doi: 10.1038/NGEO2247
- Grissino-mayer, H. D. (2017). *The Time is Right: Redefining the Principles in Dendrochronology*. University of Tennessee, Laboratory of Tree-Ring Science, Knoxville
- Hacket-Pain, A. J., Cavin, L., Friend, A. D., Jump, A. S. (2016). *Consistent limitation of growth by high temperature and low precipitation from range core to southern edge of European beech indicates widespread vulnerability to changing climate*. European Journal of Forest Research, 135(5), pp. 897–909. doi: 10.1007/s10342-016-0982-7
- Hayles, L. A., Gutiérrez, E., Macias, M., Ribas, M., Bosch, O., Camarero, J. J. (2007). *Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests*. Global Change Biology, 13(7), pp. 804–815. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01322.x
- Hermes, D. A. e Mattson, W. J. (1992). *The Dilemma of Plants: To Grow or Defend*. The Quarterly Review of Biology, 67(3), pp. 283–335. doi: 10.1086/417659
- Hughes, M. (2002). *Dendrochronology in climatology – the state of the art*, Dendrochronologia, 20, pp 95-116. doi: 1125-7865/02/20/1-2-95
- ICNF. (2013). *Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares*. 34 pp, Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. Lisboa.
- Instituto de Meteorologia I.P. (2012). *Situação de Seca Meteorológica*. Ministério da Educação e Ciência, Lisboa. Disponível em: https://www.ipma.pt/export/sites/ipma/bin/docs/relatorios/clima/boletim_seca_15jun12.pdf
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2015). *Portal do Clima*. Disponível em <http://portaldoclima.pt/pt/>. [Acedido a 2 de setembro de 2018]
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (s.d.a). *Área educativa - NAO [North Atlantic Oscillation - Oscilação do Atlântico Norte]*. Disponível em <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.nao.xml>. [Acedido a 9 de Abril de 2018]

- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (s.d.b). *Normais Climatológicas*. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima>. [Acedido a 8 de Abril de 2018]
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC. (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.
- La Marche, V. C., Graybill, D. A., Fritts, H. C., Rose, M. R. (1984). *Increasing Atmospheric Carbon Dioxide: Tree Ring Evidence for Growth Enhancement in Natural Vegetation*. Science, 225(4666), pp. 1019–1021. doi: 10.1126/science.225.4666.1019
- Lauw, A. (2011). *Estudo de anéis anuais de crescimento de árvores como indicadores climáticos em Portugal*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais. Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.
- Leal, S., Nunes, E., Pereira, H. (2008). *Cork oak (Quercus suber L.) wood growth and vessel characteristics variations in relation to climate and cork harvesting*. European Journal of Forest Research, 127, pp. 33–41. doi: 10.1007/s10342-007-0180-8
- Ledo, A., Cañellas, I., Barbeito, I., Gordo, F., Calama, R., Gea-Izquierdo, G. (2014). *Species coexistence in a mixed Mediterranean pine forest: Spatio-temporal variability in trade-offs between facilitation and competition*. Forest Ecology and Management, 322, pp 89-97. doi: 10.1016/j.foreco.2014.02.038

- Linares, J., Delgado-huertas, A., Camarero, J. J., Merino, J., Carreira, J. A. (2016). *Competition and Drought Limit the Response of Water-Use Efficiency to Rising Atmospheric Carbon Dioxide in the Mediterranean Fir Abies pinsapo*. Oecologia, 161(3), pp. 611–624. doi: 10.1007/s00442-009-1409-7
- Lombardero, M. J., Ayres, M. P., Lorio, P. L., Ruel, J. J. (2000). *Environmental effects on constitutive and inducible resin defences of Pinus taeda*. Ecology Letters, 3, pp. 329–339. doi: 10.1046/j.1461-0248.2000.00163.x
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H. (2004). *European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes since 1500*. Science, 303, pp. 1499–1503. doi: 10.1126/science.1093877
- Luz, A. (2011). *Análise da formação dos anéis de crescimento anual das árvores ao longo dum ciclo da actividade cambial*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais. Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.
- Keeley, J.E. (2012). *Ecology and evolution of pine life histories*. Annals of Forest Science. 69. Pp 445-453. doi: 10.1007/s13595-012-0201-8
- Martins, D. S., Raziei, T., Paulo, A. A., Pereira, L. S. (2012). *Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal*. Natural Hazards and Earth System Science, 12, pp. 1493–1501. doi: 10.5194/nhess-12-1493-2012
- Miranda, P. M. A., Valente, M. A., Tomé, A. R., Trigo, R., Coelho, M. F. E. S., Aguiar, A., Azevedo, E. B. (2006). 2. *O Clima de Portugal nos Séculos XX e XXI*. in Santos, F. D., Miranda, P. (ed) Alterações Climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa, pp. 45–113.
- Nabais, C., Campelo, F., Vieira, J., Cherubini, P. (2014). *Climatic signals of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in Pinus pinaster and Pinus pinea along a latitudinal gradient in Portugal*. Forestry, 87(4), pp. 598–605. doi: 10.1093/forestry/cpu021
- Navarro-Cerrillo, R. M., Rodriguez-Vallejo, C., Silveiro, E., Hortal, A., Palacios-Rodríguez, G., Duque-Lazo, J., Camarero, J. J. (2018). *Cumulative drought stress leads to a loss of growth resilience and explains higher mortality in planted than in naturally regenerated Pinus pinaster stands*. Forests, 9, pp. 1–18. doi: 10.3390/f9060358
- Palma, J.H.N. (2017). *CliPick - Climate change web picker. A tool bridging daily climate needs in process based modelling in forestry and agriculture*, Forest Systems, 26(1), eRC01, 4 pp.
- Páscoa, P., Gouveia, C. M., Russo, A., Trigo, R. M. (2017a). *Drought trends in the Iberian Peninsula over the last 112 years*. Advances in Meteorology, 2017, 4653126. doi: 10.1155/2017/4653126
- Páscoa, P., Gouveia, C. M., Russo, A., Trigo, R. M. (2017b). *The role of drought on wheat yield interannual variability in the Iberian Peninsula from 1929 to 2012*. International Journal of Biometeorology, 61(3), pp. 439–451. doi: 10.1007/s00484-016-1224-x

- Pasho, E., Camarero, J. J., de Luis, M., Vicente-Serrano, S. M. (2011). *Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain*. Agricultural and Forest Meteorology, 151, pp. 1800–1811. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.07.018
- Paulo, A. A., Rosa, R. D., Pereira, L. S. (2012). *Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal*. Natural Hazards and Earth System Science, 12(5), pp. 1481–1491. doi: 10.5194/nhess-12-1481-2012
- Peñuelas, J., Hunt, J. M., Ogaya, R., & Jump, A. S. (2008). *Twentieth century changes of tree-ring $\delta^{13}C$ at the southern range-edge of *Fagus sylvatica*: Increasing water-use efficiency does not avoid the growth decline induced by warming at low altitudes*. Global Change Biology, 14(5), pp. 1076–1088. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01563.x
- Pereira, J., Correia, A., Correia, A., Ferreira, M., Onofre, N., Freitas, H., Godinho, F. (2006). 8. *Florestas e Biodiversidade*, in Santos, F. D., Miranda, P. (ed) Alterações Climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa, pp. 303–343.
- Pimentel, C. S., Gonçalves, E. V., Firmino, P. N., Calvão, T., Fonseca, L., Abrantes, I., Correia, O., Máguas, C. (2017). *Differences in constitutive and inducible defences in pine species determining susceptibility to pinewood nematode*. Plant Pathology, 66(1), pp. 131–139. doi: 10.1111/ppa.12548
- Piraino, S., Camiz, S., Di Filippo, A., Piovesan, G., Spada, F. (2012). *A dendrochronological analysis of *Pinus pinea* L. on the Italian mid-Tyrrhenian coast*. Geochronometria, 40(1), pp. 77–89. doi: 10.2478/s13386-012-0019-z
- Pires, V. C., Silva, Á., Mendes, L. (2010). *Riscos de secas em Portugal Continental*. territorium, 17, pp. 27–34. ISSN: 1647-7723
- Ramos, A. M., Trigo, R. M., Santo, F. E. (2011). *Evolution of extreme temperatures over Portugal: Recent changes and future scenarios*. Climate Research, 48, pp. 177–192. doi: 10.3354/cr00934
- Rathgeber, C. B. K., Cuny, H. E., Fonti, P. (2016). *Biological Basis of Tree-Ring Formation: A Crash Course*. Frontiers in Plant Science, 7, 734. doi: 10.3389/fpls.2016.00734
- Raventós, J., De Luis, M., Gras, M. J., Čufar, K., Gonzáles-Hidalgo, J. C., Bonet, A., Sánchez, J. R. (2001). *Growth of *Pinus pinea* and *Pinus halepensis* as affected by dryness, marine spray and land use changes in a Mediterranean semiarid ecosystem*. Dendrochronologia, 19(2), pp. 211–220.
- Santos, F. D. (2006). 1. *Problemática das Alterações Climáticas no início do século XXI*, in Santos, F. D., Miranda, P. (ed) Alterações Climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa, pp. 17–44.
- Santos, J. F., Pulido-Calvo, I., Portela, M. M. (2010). *Spatial and temporal variability of droughts in Portugal*. Water Resources Research, 46, pp. 1–13. doi: 10.1029/2009WR008071

- Schweinnguber, F. H. (1989). *Tree Rings basics and principles*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 289 pp.
- Schweinnguber, F. H. (1993). *Trees and wood in dendrochronology: morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology*, Springer-Verlag, Berlin, 409 pp.
- Serralves. (s.d.). *Pinus pinaster Aiton*. Disponível em: <http://serralves.ubiprism.pt/species/show/883>. [Acedido a 2 de abril de 2018]
- Sheppard, P. R. (2010). *Dendroclimatology: Extracting climate from trees*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 1(3), pp. 343–352. doi: 10.1002/wcc.42
- Silva, L. C. R., Anand, M., Leithead, M. D. (2010). *Recent widespread tree growth decline despite increasing atmospheric CO₂*. PLoS ONE, 5(7), e11543. doi: 10.1371/journal.pone.0011543
- Tognetti, R., Cherubini, P., Innes, J. L. (2000). *Comparative stem-growth rates of Mediterranean trees under background and naturally enhanced ambient CO₂ concentrations*. New Phytologist, 146(1), pp. 59–74. doi: 10.1046/j.1469-8137.2000.00620.x
- Tolwinski-Ward, S.E., Anchukaitis, K.J, Evans, M.N. (2013). *Bayesian parameter estimation and interpretation for an intermediate model of tree-ring width*. Climate of the Past, 9, pp. 1481-1493. doi: 10.5194/cp-9-1481-2013
- Tolwinski-Ward, S.E., Evans, K.J., Hughes, M.K., Anchukaitis, K.J. (2011). *An efficient forward model of the climate controls on interannual variation in the tree-ring width*. Climate Dynamics, 36, pp 2419-2439. doi: 10.1007/s00382-010-0945-5
- Trigo, R. M., Añel, J. A., Barriopedro, D., García-Herrera, R., Gimeno, L., Castillo, R., Allen, M. R., Nieto, R., Massey, N. (2013). *The Record Winter Drought of 2011 – 12 in the Iberian Peninsula*. American Meteorological Society, 94(9), pp. 41–45.
- Trigo, R. M., Dacamara, C. C. (2000). *Circulation Weather Types and Their Influence on the Precipitation Regime in Portugal*. International Journal of Climatology, 20(13), pp. 1559–1581. doi: 10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1559::AID-JOC555>3.0.CO;2-5
- Trigo, R., Osborn, T. J., Corte-Real, J. (2002). *Influência da Oscilação do Atlântico Norte no clima do continente europeu e no caudal dos rios Ibéricos atlânticos*. Finisterra, 37(73), pp. 5–31. doi: 10.18055/Finis1606
- UTAD. (s.d.). *Pinus pinaster*. Disponível em: https://jb.utad.pt/especie/Pinus_pinaster. [Acedido a 21 de abril de 2018].
- UTAD. (s.d.a). *Pinus pinea*. Disponível em: https://jb.utad.pt/especie/Pinus_pinea. [Acedido a 1 de setembro de 2018].
- van der Sleen, P., Groenendijk, P., Vlam, M., Anten, N. P. R., Boom, A., Bongers, F., Pons, T. L., Terburg, G., Zuidema, P. A. (2014). *No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO₂*

- fertilization but water-use efficiency increased*. *Nature Geoscience*, 8, pp. 24–28. doi: 10.1038/ngeo2313
- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tajeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F. (2014). *Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe*. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/044001
- Vieira, J., Campelo, F., Nabais, C. (2008). *Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of Pinus pinaster to Mediterranean climate*. *Trees*, 23, pp. 257–265. doi: 10.1007/s00468-008-0273-0
- Viñas, R., Caudullo, G., Oliveira, S., Rigo, D. (2016). *Pinus pinea in Europe: distribution, habitat, usage and threats*. in Rigo, D., Caudullo, G., Durrante, T., San-Miguel-Ayanz, J. (ed), *The European Atlas of Forest Tree Species: modelling, data and information on forest tree species*, Publication Office of the European Union, Luxemburgo, pp. 130-131.
- Voelker, S. L., Stambaugh, M. C., Renée Brooks, J., Meinzer, F. C., Lachenbruch, B., Guyette, R. P. (2017). *Evidence that higher [CO₂] increases tree growth sensitivity to temperature: a comparison of modern and paleo oaks*. *Oecologia*, 183(4), pp. 1183–1195. doi: 10.1007/s00442-017-3831-6
- Warren, C. R., Aranda, I., Cano, F. J. (2012). *Metabolomics demonstrates divergent responses of two Eucalyptus species to water stress*. *Metabolomics*, 8(2), pp. 186–200. doi: 10.1007/s11306-011-0299-y
- World Meteorological Organization. (2013). *The Global Climate 2001–2010: A Decade of Climate Extremes Summary Report*. World Meteorological Organization. Génova.